



Väylävirasto  
Trafikledsverket

Opinnäytetyö  
6/2020

Anniina Tuomala

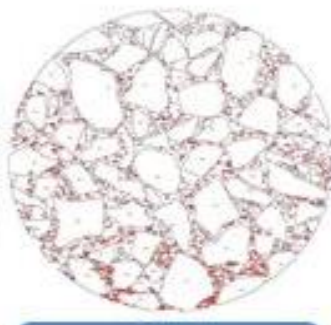
# KIVIAINEKSEN LAADUN VAIKUTUS ASFALTTI- PÄÄLLYSTEEN NASTARENGAS- KULUMISKESTÄVYYTEEN

Prall-arvo



18,4 ml

Kaikkien  
kivien  
peittävyys



68 %

Yli 50 mm<sup>2</sup>  
kivien  
peittävyys



54 %

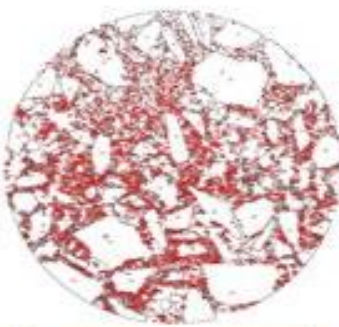
Yli 150 mm<sup>2</sup>  
kivien  
peittävyys



31 %



25,8 ml



55 %



28 %



11 %



Anniina Tuomala

**Kiviaineksen laadun vaikutus  
asfalttipäällysteen nastarengas-  
kulumiskestävyyteen**

Opinnäytetyö 6/2020

Väylävirasto

Helsinki 2020

Kannen kuva: Anniina Tuomala

Verkkojulkaisu (pdf) ([www.vayla.fi](http://www.vayla.fi))

ISSN 2490-1202

ISBN 978-952-317-810-6

Väylävirasto  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puh. +358(0)295 34 3000



Anniina Tuomala:

## **Kiviaineksen laadun vaikutus asfalttipäällysteen nastarengaskulumiskestävyys**

Väylävirasto. Helsinki 2020. Opinnäytetyö 6/2020. 132 sivua ja 4 liitettä. ISSN 2490-1202, ISBN 978-952-317-810-6.

Asiasanat: Prall-menetelmä, litteysluku, kuulamylyarvo, kulumiskestävyys, nastarenkaat

## **Tiivistelmä**

Nastarenkaat ovat ainoa päällysteen kulumista aiheuttava tekijä vilkasliikenteisillä teillä pohjoisissa olosuhteissa ja myös yksi merkittävimmistä tekijöistä niiden urautumisessa. Kiviaineksen laadulla on suuri vaikutus päällysteen nastarengaskulumiskestävyys, jota voidaan arvioida kiviaineksen kuulamylyarvon tai päällystenäytteen Prall-arvon perusteella. Kiviaineksen muodon on havaittu vaikuttavan kiviaineksen kuulamylyarvoon. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kokeellisesti, miten asfalttikiviaineksen kuulamylyarvo ja muoto vaikuttavat päällysteen kulumiskestävyys eli laboratorio-olosuhteissa Prall-arvoon. Samalla tarkasteltiin myös Prall-menetelmän laboratorion sisäistä toistettavuutta ja laboratorioden välistä uusittavuutta.

Työn kirjallisuusselvityksessä on esitetty päällysteen nastarengaskulumiskestävyyttä mittaavien laboratoriomenetelmien kehitysprosessi sekä keskeiset johtopäätökset Prall-menetelmää käsitelleistä pohjoismaisista vertailututkimuksista. Lisäksi on tehty yhteenvedo kiviaineksen ominaisuuksien ja päällysteen kulumiskestävyys välistä yhteyttä käsitelleistä tutkimuksista. Tutkimuksen kokeellisessa osassa tehtiin yhteensä 100 Prall-testiä näytteille, jotka porattiin laboratoriossa valmistetuista SMA 16 -laatoista. Näytteissä karkeana kiviaineksena käytettiin kolmen eri louhoksen kiviainesta kolmella eri litteyslukutasolla. Näytteistä 90 tutkittiin Tampereen yliopiston laboratoriossa uudella modifioidulla PrallS-laitteella. Lisäksi kahdessa muussa suomalaisessa asfalttilaboratoriossa tutkittiin 5 näytettä vastaavilla laitteilla.

Kirjallisuusselvityksen perusteella Prall-arvon havaittiin korreloivan asfalttimassan karkean kiviaineksen kuulamylyarvon kanssa. Tutkimuksessa 11,2/16 mm lajitteen kuulamylyarvon suurentaminen 3 yksiköllä suurensi Prall-arvoa noin 4 yksikön verran. Suomessa käytössä olevan laskennallisen Prall-arvon kaavan havaittiin kuulamylytasolla  $A_{N7}$  antavan lähes saman tuloksen kuin Tampereen yliopistossa tutkituilla näytteillä, kun taas kuulamylytasolla  $A_{N10}$  kaavan havaittiin yliarvioivan kulumaa noin 3 yksikköä tutkittujen näytteiden tuloksiin verrattuna.

Asfalttimassan karkean kiviaineksen litteysluvun muokkaamisella ei havaittu olevan selkeää vaikutusta Prall-arvoon. Kahden louhoksen kiviaineksesta valmistettujen näytteiden Prall-arvo kasvoi hieman litteysluvun kasvaessa, kun taas yhdellä louhoksella Prall-arvo pieneni hieman litteysluvun kasvaessa. Kunkin louhoksen kiviaineksista valmistettujen näytteiden Prall-tulosten keskiarvo pysyi kuitenkin 1,4–2,1 yksikön sisällä, kun litteyslukua muokattiin 20 yksikköä. Tutkimuksen perusteella kiviaineksen litteyslukua modifioitaessa kuulamylyarvo saattaa muuttua hieman enemmän kuin Prall-arvo. Tämä ei kuitenkaan

suoraan tarkoita, että kiviaineksen muoto-ominaisuuksia parantamalla kuulamyllyarvo paranisi enemmän kuin valmiin päällysteen kulumiskestävyys. Murskausprosessissa tehtävällä muoto-ominaisuuksien parantamisella, kuten kubitoinnilla, voidaan vaikuttaa vain rajoitetusti kuulamyllyarvoon eli esimerkiksi muokata kuulamyllyluokan rajalla olevasta kiviaineksestä seuraavaan kuulamylly-luokkaan soveltuvaa asfalttikiviainesta. Lisäksi muoto-ominaisuuksia parantamalla voidaan parantaa epäsuorasti päällysteen nastarengaskulumiskestävyyttä, sillä esimerkiksi hyvämuotoisella kiviaineksella asfalttimassan tiivistettävyys paranee ja samalla päällysteen tyhjätila pienenee.

Tutkimuksessa Prall-tulosten laboratorion sisäinen hajonta ja laboratorioden välinen hajonta havaittiin suuriksi. Tutkimuksessa 10 rinnakkaisnäytteen Prall-tuloksen vaihteluväli oli noin 4–10 yksikköä ja näistä määritetty laboratorion sisäinen toistettavuus oli keskimäärin 31 %. Prall-tuloksia vertailtiin myös kolmen asfalttilaboratorion välillä. Laboratorioden välillä Prall-tulosten keskiarvoissa oli eroa 3–6 yksikköä, ja laboratorioden välisillä vertailunäytteillä Prall-menetelmän toistettavuus oli 22 % ja uusittavuus 53 %. Standardin SFS-EN 12697-16 (2016) mukaiset toistettavuuden arvo 15 % ja uusittavuuden arvo 27 % ylittyivät siis tutkimuksessa huomattavasti.

Tutkimuksessa näytteen pinnan kivipeitteisyyden sekä pienien ja suurien kivien osuuden havaittiin vaikuttavan Prall-tulokseen. Tämän vuoksi näytteet olisi hyvä valokuvata ennen testiä ja testin jälkeen. Lisäksi tutkimuksen perusteella hajontaa tuloksiin voi aiheuttaa erot näytteiden tyhjätiloissa. Prall-menetelmään ehdotettiin lisättäväksi tarkastelua tilastollisesti poikkeavien ääriarvojen poistamisesta ja lisätestien tekemisestä suurien poikkeamien myötä. Lisäksi eri laboratorioden Prall-laitteiden välisten tuloseröjen syiden selvittämistä on syytä edelleen jatkaa. Jatkotutkimusaiheena esiin nousi kiviaineksen muodon ja kuulamyllyarvon vaikutus päällysteen nastarengaskulumiskestävyyteen tieolosuhteissa, esimerkiksi minikoetiejärjestelyillä toteutettuna.

Anniina Tuomala

## **Inverkan av stensubstansens kvalitet på asfaltbeläggningens dubbdäcksslitstyrka**

Trafikledsverket. Helsingfors 2020. Lärdomsprov 6/2020. 132 sidor och 4 bilagor. ISSN 2490-1202, ISBN 978-952-317-810-6.

Ämnesord: Prall metod, flisighetsindex, nötningmotstånd, nordiska metod för nötning motstånd, dubbdäck

## **Sammandrag**

Dubbdäck är den enda faktor som orsakar slitage på högtrafikerade vägar i nordliga förhållanden och även en av de viktigaste faktorerna i spårbildningen av dessa vägar. Ballasts kvalitet har stor inverkan på beläggningens dubbdäcksslitstyrka, vilket kan bedömas utifrån ballasts kulkvarnsvärde eller beläggningsprovers Prallvärde. Kornformen hos ballast har konstaterats påverka ballasts kulkvarnsvärde. Syftet med denna studie var att experimentellt bestämma hur asfaltballasts kulkvarnsvärde och kornform påverkar beläggningens nötningmotstånd dvs. Prallvärde i laboratorieförhållanden. Samtidigt undersöktes även Prallmetodens repeterbarhet internt i laboratorium och reproducerbarhet mellan olika laboratorier.

I arbetets litteraturstudie presenteras utvecklingsprocessen för laboratoriemetoder som mäter asfaltbeläggningens nötningmotstånd och centrala slutsatser från nordiska jämförande studier om Prallmetoden. Dessutom har en sammanfattning av studierna om sambandet mellan ballasts egenskaper och beläggningens nötningmotstånd genomförts. I den experimentella delen av undersökningen gjordes totalt 100 Pralltester på provkroppar som borrades av laboratorietillverkade SMA 16-plattor. Som grov stensubstans användes i asfaltmassor ballast från tre olika stenbrott och ballasts flisighetstal var av tre olika nivåer. Av proverna undersöktes 90 med ny modifierad PrallS-utrustning vid Tammerfors universitets laboratorium. Dessutom undersöktes 5 prover med liknande utrustning vid två andra finska asfaltlaboratorier.

Baserat på litteraturstudien fann man att Prallvärdet korrelerar med kulkvarnsvärdet för asfaltmassans grova ballast. I studien ökade Prallvärdet med cirka 4 enheter när kulkvarnsvärdet för en kornfraktion på 11,2/16 mm förstorades med 3 enheter. Man fann att den formel som i Finland används för det kalkylmässiga Prallvärdet för kulkvarnsnivån  $A_{N7}$  gav nästan samma resultat som de prover som undersöktes vid Tammerfors universitet, medan man fann att formeln för kulkvarnsnivån  $A_{N10}$  överskattade slitaget med ungefär 3 enheter jämfört med resultaten av de undersökta proverna.

Man konstaterade att en modifiering av ballasts inte har någon tydlig effekt på Prallvärdet. Prallvärdet för prover gjorda av ballast från två stenbrott ökade något i takt med att flisighetstalet ökade, medan Prallvärdet vid ett stenbrott minskade något i takt med att flisighetstalet ökade. De genomsnittliga Prallresultaten för ballastproverna vid varje stenbrott förblev dock inom 1,4 till 2,1 enheter när flisighetstalet modifierades med 20 enheter. Baserat på studien är det möjligt att kulkvarnsvärdet ändras en aning mer än Prallvärdet när flisighetstalet modifieras. Detta innebär dock inte direkt att kulkvarnsvärdet

förbättras mer än nötningmotstånd för den färdiga beläggningen om ballasts kornformegenskaper förbättras. Genom att förbättra kornformegenskaperna i krossningsprocessen, såsom kubisering, är det endast möjligt att i en viss mån påverka kulkvarnsvärdet, till exempel modifiera en ballast som ligger på gränsen av en kulkvarnsklass så att den bildar en asfaltballast som är lämplig för nästa kulkvarnsklass. Dessutom kan en förbättring av kornformegenskaperna indirekt förbättra beläggningens dubbdäck nötningmotstånd, eftersom till exempel en ballast av god kornform förbättrar asfaltmassans tätbarhet och samtidigt minskar beläggningens hålrumshalt.

I studien konstaterades att den interna spridningen av Prallresultaten i laboratoriet och spridningen mellan laboratorierna var hög. I studien var variationsintervallet för Prallresultatet för 10 parallellprover cirka 4 till 10 enheter, och den fastställda genomsnittliga interna repeterbarheten för ett laboratorium utifrån dessa 31 %. Prallresultaten jämfördes också mellan tre asfaltlaboratorier. Det fanns en skillnad på 3 till 6 enheter i medelvärdet för Prallresultaten mellan laboratorierna, och i referensproverna mellan laboratorierna var Prallmetodens repeterbarhet 22 % och reproducerbarhet 53 %. Repeterbarhetsvärdet på 15 % och reproducerbarhetsvärdet på 27 % enligt standarden SFS-EN 12697-16 (2016) överskreds alltså avsevärt i studien.

I studien konstaterades att provytans stentäckning och andelen små och stora stenar påverkade Prallresultatet. Därför vore det bra att fotografera provkroppar före och efter testet. Dessutom visar studien att skillnader i provernas hålrumshalt kan orsaka spridning i resultaten. Det föreslogs att man till Prallmetoden lägger till avlägsnande av statistiskt avvikande extremvärden och genomförande av ytterligare tester på grund av de stora avvikelserna. Dessutom är det skäl att fortsätta undersöka orsakerna till skillnaderna i resultaten mellan Prallutrustningen vid de olika laboratorierna. Som ett tema för fortsatta studier lyftes fram inverkan av ballasts kornform och dess kulkvarnsvärde på beläggningens dubbdäck nötningmotstånd i vägförhållanden, till exempel genom att genomföra vägarrangemang för minitester.

Anniina Tuomala

## **The Effect of Aggregate's Quality on the Asphalt Pavement's Abrasion Resistance by Studded Tyres**

Finnish Transport Infrastructure Agency. Helsinki 2020. Thesis 6/2020. 132 pages and 4 appendices. ISSN 2490-1202, ISBN 978-952-317-810-6.

Keywords: Prall method, flakiness index, Nordic abrasion test, abrasion resistance, studded tyres

## **Abstract**

Studded tyres are the only factor causing asphalt pavement's abrasion on busy roads in Northern conditions. Studded tyres are also one of the most significant factors in the rutting of pavements. The quality of the aggregate has a large effect on the asphalt pavement's abrasion resistance by studded tyres. The abrasion resistance of pavement can be estimated by the Nordic abrasion value of asphalt aggregate (EN 1097-9) or the Prall value of asphalt pavement sample (EN 12697-16, method A). The shape of the aggregate has been found to affect the Nordic abrasion value. The purpose of this study was to research experimentally how the Nordic abrasion value and the shape of asphalt aggregate effect on pavement's abrasion resistance, i.e. the Prall value in the laboratory testing. Also, a variation of the Prall values within laboratories (repeatability) and between laboratories (reproducibility) were researched.

The literature part includes a description of the development process of the laboratory methods measuring pavement's abrasion resistance by studded tyres and the conclusions from the Nordic round robin studies of the Prall method. In addition, the studies related the relationship between aggregate properties and pavement's abrasion resistance were summarized. In the experimental part of the research 100 Prall tests were performed. The test specimens were prepared in laboratory conditions by coring from a SMA 16 mixture slab. The coarse aggregate in the mixes was varied between three different quarries and Nordic abrasion levels. The shape of each coarse aggregate was modified to three different flakiness index levels. Totally 90 test specimens were tested in the laboratory of Tampere University using the new modified Prall equipment. In addition, five test specimens were tested in the two other Finnish asphalt laboratories using similar modified Prall equipment.

Based on the literature review, the Prall value was found to correlate with the Nordic abrasion value of the asphalt mix's coarse aggregate. In this study, by increasing the Nordic abrasion value of the fraction 11.2/16 mm by 3 units the Prall value increased about 4 units. When the Prall value is predicted with an experimental equation using the Nordic abrasion value, the test results of this study correlate with the equation well at the level  $A_N7$ . When the Nordic abrasion value is in level  $A_N10$ , the equation overestimates the Prall value about 3 units according to the test results.

Variation of the flakiness index of the asphalt mix's coarse aggregate was not found to have any significant effect on the Prall value. The Prall value increased slightly as the flakiness index increased with the samples made of coarse aggregate from two quarries, while the Prall value decreased slightly as the

flakiness index increased with the samples made of course aggregate from one quarry. When the flakiness index was changed 20 units, the variation of the average Prall value for each quarry was only 1.4 to 2.1 units. Based on this study, the variation of the flakiness index of aggregate effects slightly more on the Nordic abrasion value than on the Prall value. However, this does not necessarily mean that improving the shape properties of the aggregate would improve the Nordic abrasion value more than the abrasion resistance of asphalt pavement. The improvement of the aggregate's shape properties in the crushing process has only a limited effect on the Nordic abrasion value. For example, when the Nordic abrasion value is slightly over the limit value, the modification of the shape may decrease the value to a better class. In addition, by improving the shape properties of the aggregate, the abrasion resistance of the pavement may be improved indirectly. With good-shaped aggregate the compactibility of the asphalt mix is better and therefore the air voids in the pavement are reduced.

In this study, the variation of Prall results was found to be large within laboratories and between laboratories. In the study, the range of 10 individual Prall results was approximately 4 to 10 units and based on these values the mean repeatability within laboratory was determined to be 31%. The Prall results were also compared between three asphalt laboratories. In the average Prall results there were the differences of 3 to 6 units between the laboratories and based on these values the repeatability of the Prall method was 22% and the reproducibility was 53%. Therefore, the repeatability of 15% and the reproducibility of 27% specified in the standard EN 12697-16 (2016) were significantly exceeded in this study.

Based on the image analysis of this study the aggregate coverage and the amount of small and large aggregate grains on the sample surface were clearly affecting the Prall result. Therefore, the samples should be photographed before and after the test. In addition, differences in air voids in the specimens may have effect on the variation of the results based on this study. To improve the reliability of the Prall test it was proposed to add a statistical examination of the test results to the Prall test standard. The main idea of the addition is to remove the statistically deviating extreme values and make additional tests when the variation in results is too large. In addition, the causes for the differences in results between Prall equipment in the different laboratories should be further studied. Moreover, the effect of the aggregate shape and the Nordic abrasion value on the pavement's abrasion resistance in the field conditions was proposed as a further research topic, for example, implemented with mini test road.

## Esipuhe

Tämän diplomityön on tehnyt Anniina Tuomala Tampereen yliopiston Maa-, pohja- ja ratarakenteiden yksikössä, jossa työtä ovat ohjanneet Pirjo Kuula ja Pauli Kolisoja. Väyläviraston puolesta työtä ovat ohjanneet Katri Eskola, Laura Valokoski ja Kari Lehtonen.

Työ on jatkoa vuonna 2019 valmistuneelle Niko Hietalan diplomityölle "[Asfaltti-kiviaineksen raemuodon ja murskaustavan vaikutus kuulamylläryarvoon](#)", joka on julkaistu Väyläviraston tutkimuksia -sarjassa 15/2019.

Helsingissä lokakuussa 2020

Väylävirasto

# Sisältö

1	JOHDANTO .....	12
2	PÄÄLLYSTEEN NASTARENGASKULUMINEN .....	14
2.1	Nastarengaskulumismekanismi.....	14
2.2	Päällysteen nastarengaskulumiskestävyys .....	17
3	PÄÄLLYSTEELLE ASETETTAVAT VAATIMUKSET .....	22
3.1	Vaatimukset nastarengaskulumiskestävyydelle .....	22
3.1.1	Vaatimusten asettaminen .....	22
3.1.2	Kuulamylyllyarvo ja päällysteen laskennallinen kulumisnopeus ....	23
3.1.3	Prall-arvo .....	24
3.1.4	SRK-arvo.....	27
3.2	Vaatimukset kiviaineksen muodolle .....	28
3.3	Vaatimukset muissa Pohjois-Euroopan maissa .....	29
4	NASTARENGASKULUMISKESTÄVYYDEN MITTAUSMENETELMIEN KEHITTYMINEN .....	33
4.1	Taustaa .....	33
4.1.1	SRK-menetelmä Suomessa.....	33
4.1.2	Prall-menetelmä Ruotsissa .....	36
4.1.3	Yhtenäinen standardi.....	38
4.2	Prall-menetelmän toistettavuus ja uusittavuus .....	42
4.3	Prall-menetelmän nykytilanne.....	46
5	NASTARENGASKULUMISKESTÄVYYTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT .....	53
5.1	Kiviaineksen muodon ja lujuuden vaikutus kulumiskestävyyteen .....	53
5.2	Muut kulumiskestävyyteen vaikuttavat tekijät .....	59
5.2.1	Näytteen tyhjätila.....	59
5.2.2	Eri laitteiden ominaisuudet .....	60
5.2.3	Kivilajityyppi .....	62
5.3	Nastarengaskulumisen simulointi Yhdysvalloissa .....	63
5.4	Nastarengaskulumisen ennustaminen .....	64
5.5	Yhteenveto nastarengaskulumis- kestävyteen vaikuttavista tekijöistä .....	70
6	KIVIAINESNÄYTTEET JA -TESTIT .....	73
6.1	Kiviainesten testausohjelma ja -menetelmät .....	73
6.1.1	Pesuseulonta .....	73
6.1.2	Litteysluvun määrittäminen .....	74
6.1.3	Kuulamylytesti .....	75
6.2	Näytteenotto ja esikäsittely .....	76
6.3	Kiviainestestien tulokset .....	78
6.3.1	Louhos B .....	78
6.3.2	Louhos C .....	81
6.3.3	Louhos D .....	82
7	ASFALTTINÄYTTEIDEN TESTAUSOHJELMA JA -MENETELMÄT .....	84
7.1	Testausohjelma .....	84
7.2	Asfalttimassan suunnittelu .....	84
7.3	Lajitteen 11,2/16 mm modifiointi .....	87



---

7.4	Asfalttimassan ja -laatan valmistus .....	88
7.5	Prall-menetelmä .....	92
8	TULOKSET .....	95
8.1	Massa B .....	95
8.2	Massa C .....	95
8.3	Massa D .....	96
8.4	Vertailulaboratoriot .....	97
8.5	Tulosten yhteenveto .....	97
9	TULOSTEN ANALYSOINTI JA VERTAILU .....	98
9.1	Tulosten hajonta ja Prall-menetelmän toistettavuus .....	98
9.2	Kuulamylyarvon vaikutus Prall-arvoon .....	100
9.3	Litteysluvun vaikutus Prall-arvoon .....	103
9.4	Tyhjätilan vaikutus Prall-arvoon .....	106
9.5	Tulosten vertailu laboratorioiden välillä ja Prall-menetelmän uusittavuus .....	108
9.6	Näytteiden pinnan kivistyyden vaikutus Prall-arvoon .....	112
9.7	Prall-menetelmän haasteet ja kehitys- ehdotukset .....	121
10	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	124
LIITTEET		
Liite 1	Valokuvat näytteistä	
Liite 2	Yksittäistulokset litteyslukutasoittain	
Liite 3	Näytteiden tyhjätilat	
Liite 4	Kuva-analyysin tulokset	

# 1 Johdanto

Nastarenkaat ovat ainoa päällysteen kulumista aiheuttava tekijä vilkasliikenteillä teillä pohjoisissa olosuhteissa ja myös yksi merkittävimmistä tekijöistä niiden urautumisessa. Kulumisen tapahtuu, kun nastat iskevät, hiertävät ja raapaisevat päällysteen kiviainesta ja sideainetta. Nastarenkaiden käyttö parantaa liikenneturvallisuutta, mutta toisaalta niiden myötä tapahtuva päällysteen urautuminen aiheuttaa haittaa liikenneturvallisuudelle ja siten tihentää päällysteen uusimistarvetta. Vuosittain merkittävä osa päällystykseen käytettävistä raahoista kuluukin vilkasliikenteisten väylien urien korjaukseen. Tämän vuoksi päällysteen nastarengaskulumista on pyritty Pohjoismaissa vähentämään muun muassa rajoittamalla nastarenkaiden ominaisuuksia sekä käyttöä.

Päällysteen nastarengaskulumiseen vaikuttavat myös päällysteen ominaisuudet. Merkittävimpiä tekijöitä ovat asfalttikiviaineksen laatu ja maksimirakoko sekä karkean kiviaineksen osuus päällysteessä, mutta myös esimerkiksi sideaineen tyyppi ja päällysteen tyhjätila vaikuttavat kulumisnopeuteen. Päällysteen nastarengaskulumiskestävyys pyritään Suomessa varmistamaan asettamalla vaatimus joko kiviaineksen kulutuskestävyyttä kuvaavalle kuulamylyarvolle, kuulamylyarvoon pohjautuvalle päällysteen laskennalliselle kulumisnopeudelle tai päällysteen kulumiskestävyttä kuvaavalle Prall-arvolle. Kiviaineksen kuulamylyarvon ja muodon välillä on havaittu yhteys: kuulamylyarvo pienenee kiviaineksen ollessa vähemmän puikkoista eli litteysluvun pienetessä. Yhteyden vuoksi kiviaineksen kulutuskestävyyttä on pyritty parantamaan muotoilemalla sitä murskausprosessissa keskipakomurskaimella. Osa tilaajista on kuitenkin kieltänyt muotoilun, sillä kuulamylyarvon epäillään paranevan prosessissa enemmän kuin päällysteen kulumiskestävyyden.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää, miten asfalttikiviaineksen kuulamylyarvo ja litteysluku vaikuttavat päällysteen kulumiskestävyyteen laboratorio-olosuhteissa eli Prall-arvoon. Tutkimuksen tuloksia verrataan päällysteen laskennallisen kulumisnopeuden kaavaan. Lisäksi tutkimuksessa arvioidaan Prall-menetelmän toistettavuutta ja uusittavuutta, sillä niissä on havaittu haasteita pohjoismaisissa vertailututkimuksissa.

Tutkimus koostuu kirjallisuusselvityksestä ja kokeellisesta osuudesta. Kirjallisuusselvityksessä selvitetään päällysteen nastarengaskulumismekanismi ja päällysteeltä nastarengaskulumiskestävyyden vuoksi vaadittavat ominaisuudet. Kirjallisuusselvitykseen kootaan päällysteen nastarengaskulumiskestävyyttä mittaavien laboratoriomenetelmien kehitysprosessi ja Prall-menetelmän toistettavuutta käsitelleiden pohjoismaisten vertailututkimusten keskeiset johtopäätökset. Lisäksi työssä selvitetään kiviaineksen ominaisuuksien ja päällysteen kulumiskestävyyden välistä yhteyttä käsittelevien tutkimusten nykytilanne.

Kokeellisessa osuudessa tutkitaan litteysluvun vaihtelun vaikutusta Prall-arvoon kolmen louhoksen kiviaineilla. Tutkimukseen valitaan Suomen pääväylien päällysteissä käytettäviä kiviaineita. Laboratoriossa kiviaineksista valmistetaan SMA 16 -asfalttimassaa, johon 11,2/16 mm lajitteeksi vaihdetaan kiviainesta kolmella eri litteyslukutasolla. Näistä asfalttimassoista valmistetuista päällystelaatoista porataan näytekappaleet, joista määritetään Prall-arvo.

---

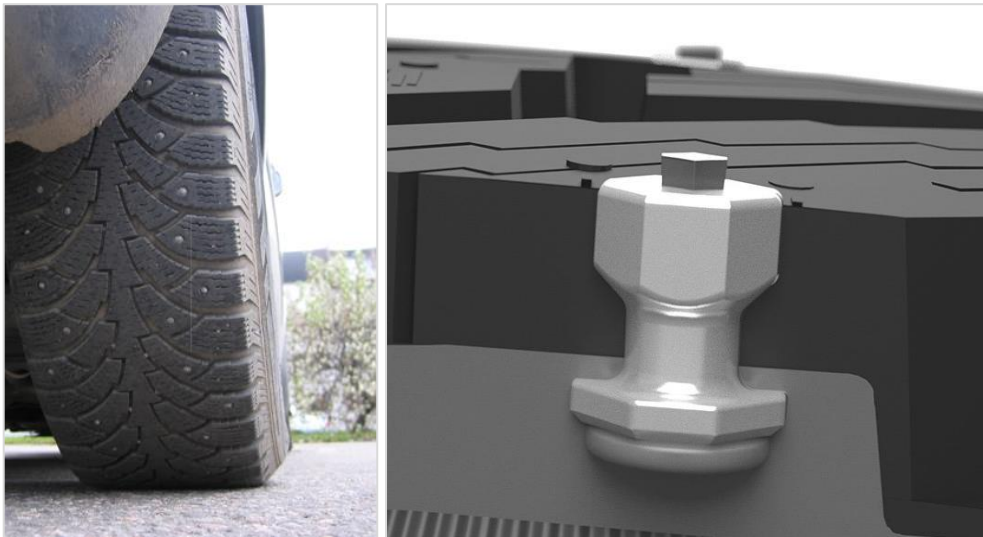
Prall-menetelmän toistettavuutta arvioidaan tutkimalla kaikista asfalttimalasoista 10 rinnakkaista näytekappaletta. Lisäksi Prall-menetelmän uusittavuutta arvioidaan testauttamalla näytekappaleita myös kahdessa muussa asfalttilaboratoriossa.

## 2 Päällysteen nastarengaskuluminen

Tierakenteen urautuminen voidaan jaotella aiheuttajan perusteella neljään eri tyyppiin. Tyypin 0 urautuminen aiheutuu rakentamisen jälkeisestä tiivistymisestä, tyypin 1 urautuminen heikkolaatuisesta kantavasta kerroksesta, tyypin 2 pohjamaan muodonmuutoksista ja tyypin 3 renkaiden kuluttavan vaikutuksen myötä. (ROADEXb) Näiden lisäksi urautuminen voi johtua myös sidottujen rakennekerrosten deformaatiosta. Sitomattomien rakennekerrosten deformaatio tapahtuu yleensä keväällä, jolloin on runsaasti sulamis- ja sadevesiä. Sidottujen rakennekerrosten deformaatio tapahtuu kesällä asfalttipäällysteen lämmetessä, kun taas nastarenkaiden aiheuttama päällysteen kuluminen tapahtuu talviaikaan. (Lundberg et al 2019)

### 2.1 Nastarengaskulumismekanismi

Nastarenkaiden käytön tarkoituksena on parantaa talviaikaan ajoneuvojen ohjattavuutta ja liikenneturvallisuutta. Nastarenkaita käytetään muun muassa Suomessa, Ruotsissa, Norjassa, Venäjällä ja Yhdysvalloissa. (Lundberg et al 2019) Pohjoismaissa nastarenkaita on käytetty 1970-luvulta lähtien (Gustafsson & Eriksson 2015). Nastarenkaat aiheuttavat kuitenkin toistuvaa iskua päällysteeseen, jolloin päällysteen pinta kuluu ja karkeutuu. Nastarenkaiden käytön myötä päällysteestä myös irtoaa hiukkasia ilmaan ja melu lisääntyy. (Lundberg et al 2019) Kuvassa 1 on esitetty nastarengas sekä periaatekuva renkaan nastasta.



Kuva 1. Nastarengas ja renkaan nasta (ROADEXb; Kal Tire 2020).

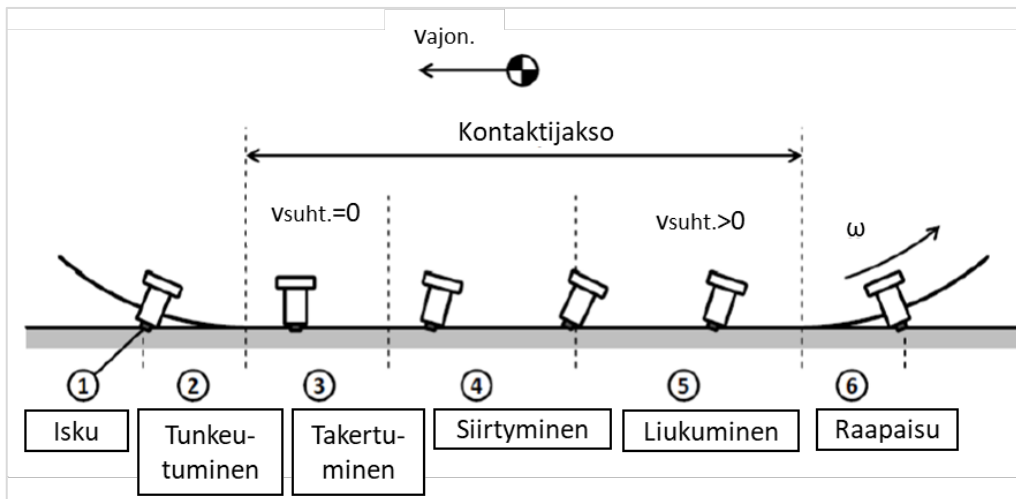
Renkaan nastan ja päällysteen välisestä kontaktista voidaan erottaa neljä vaihetta: dynaaminen alkuisku, dynaaminen pistovoima, hierto ja raapaisu (Lampinen 1993). Kuvassa 2 on esitetty kontaktin eri vaiheet.



Kuva 2. Nastarenkaan ja päällysteen välisen kontaktin vaiheet (Lampinen 1993).

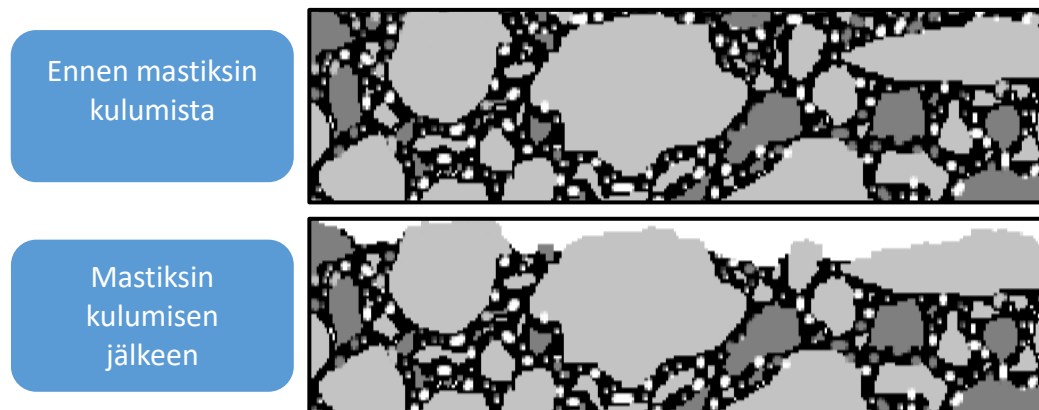
Ensimmäisenä päällysteeseen kohdistuu alkuisku. Tällöin päällysteeseen kohdistuva voima on suurimmillaan, mutta iskun kesto on vain kymmeniä mikrosekunteja. Alkuiskun suuruuteen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi nastan massa ja ulkonema. Pistovoima taas tapahtuu nastan painautuessa päällysteeseen. Tässä vaiheessa voima on suuruudeltaan noin puolet alkuiskun voimasta, mutta pistovoima kestää alkuiskua pidempään. Hiertovaiheessa nasta liikkuu päällysteen pintaa pitkin. Hiertovaihe on kontaktin vaiheista pisin, ja hiertovoiman suuruuteen vaikuttavat muun muassa ajonopeus, tien geometria sekä ajoneuvon kiihdyttäminen ja jarruttaminen. Myös pistovoiman suuruus vaikuttaa hierron suuruuteen. Viimeisenä nastan ja päällysteen välisessä kontaktissa nasta raapaisee päällystettä. (Lampinen 1993)

Nastarenkaan ja päällysteen välinen kontakti voidaan jakaa myös edellä esitettyä tarkemmin kuuteen eri vaiheeseen. Tällöin päävaihteita ovat isku-, kontakti- ja raapaisuvaiheet, joista kontaktivaihe voidaan jakaa edelleen tunkeutumis-, takertumis-, siirtymis- ja liukumisvaiheisiin. (Mustonen 2019) Kontaktin kuusi vaihetta on esitetty kuvassa 3. Kuvassa ajoneuvo liikkuu vasemmalle ja rengas pyörii vastapäivään.



Kuva 3. Nastarenkaan ja päällysteen välisen kontaktin kuusi vaihetta (muokattu lähteestä Mustonen 2019).

Asfalttipäällyste koostuu kiviaineksesta, sideaineesta ja lisäaineista (Asfalttinormit 2017). Nastarengas kuluttaa päällysteestä ensimmäisenä hienoaineksesta ja sideaineesta muodostuvaa mastiksia. Mastiksin kulumisen jälkeen karkeammat kivirakeet tulevat esiin ja niiden kulumisen alkaa. Päällysteen nastarengaskontaktissa mastiksi kuluu nopeammin kuin suuret kivirakeet. Kontaktin isku- ja hiertovaiheet kuluttavat karkeaa kiviainesta ja lisäksi jonkin verran hienoa kiviainesta. Iskuvaiheessa kivirakeet voivat myös murskautua tai raapaisuvaiheessa irrota. (Lampinen 1993) Kuvassa 4 on esitetty päällysteen pinta ennen ja jälkeen mastiksin kulumista.



Kuva 4. Päällysteen pinta ennen ja jälkeen mastiksin kulumista (muokattu lähteestä Siebert & Mork 2016).

Nastarengaskuormituksen myötä päällysteeseen syntyy urat, jotka ovat terävä-reunaiset ja henkilöauton akselileveyden etäisyydellä toisistaan (ROADExb). Tyypillisesti henkilöauton akselileveys on noin 1,5–1,7 m (RT 98-11213 2016), ja esimerkiksi Virtala et al. (2019) tulkitsivat urautumisen aiheuttajana olevan nastarenkaat, mikäli urien välinen etäisyys oli 1,4–1,7 m. Jos taas päällysteen urat ovat loivat ja raskaan kaluston akselileveydellä toisistaan, ei urautumisen syynä yleensä ole nastarenkaat (ROADExb). Kuvassa 5 on esitetty päällysteen nastarengaskulumisurat.

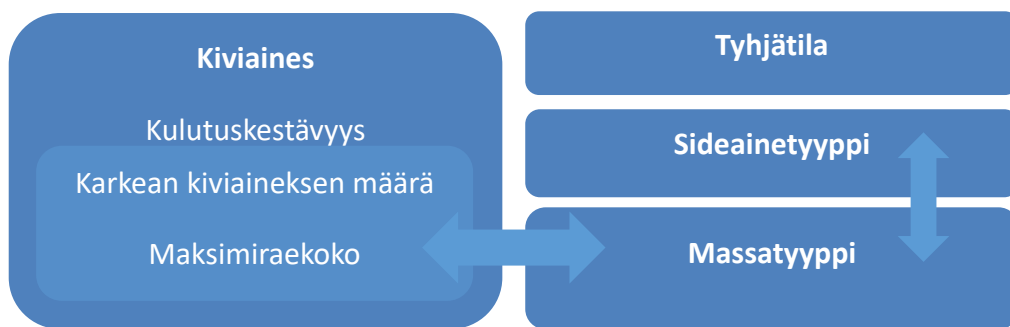


Kuva 5. Päällysteen nastarengaskulumisurat (Tuomala 2020).

Virtala et al. (2019) havaitsivat tutkimuksessaan, että nastarengaskuluma oli vuosina 2017–2019 Suomessa noin 0,3–1,5 mm talvessa riippuen tien liikennemäärästä. Tutkimuksessa ei tosin ollut mukana Suomen vilkasliikenteisimpiä väyliä, joten nastarengaskuluma voi olla myös tutkimuksen havaintoja suurempi.

## 2.2 Päällysteen nastarengaskulumiskestävyys

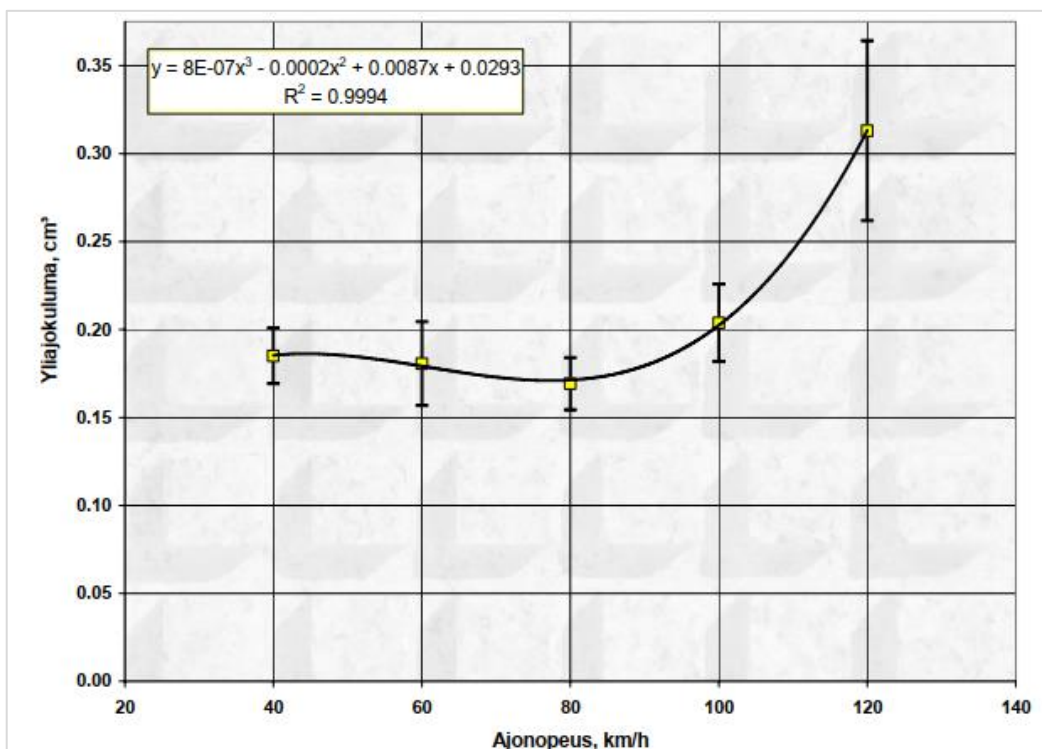
Päällysteen nastarengaskulumiskestävyydellä tarkoitetaan sitä, miten päällyste vastustaa liikennekuormituksen aiheuttamaa kulumista (Asfalttinormit 2017). Asfalttipäällysteen nastarengaskulumiskestävyudessa keskeisiä tekijöitä ovat karkeiden kiviainesrakeiden lujuus, koko ja määrä. Kiviaineksen nastarengaskulutuskestävyysominaisuudet vaihtelevat kivilajeittain. Kivilajin iskunkestävyys voi olla hyvä, mutta saman kivilajin hiovan kulutuksen kestävyys taas voi olla heikko. Mitä suurempi on päällysteen karkean kiviaineksen maksimiraekoko, sitä parempi päällysteen nastarengaskulumiskestävyys tyypillisesti on. Myös asfalttimassaan käytetyn kiviaineksen rakeisuuskäyrän muoto vaikuttaa, sillä merkittävää päällysteen nastarengaskulumiskestävyudessa on karkean yli 8 mm kiviaineksen määrä. Mikäli asfalttimassassa on runsaasti keskikokoisia rakeita, jää päällysteessä karkeiden rakeiden väliin suuri etäisyys. Epäjatkuvan rakeisuuskäyrän kiviaineksesta valmistettu asfalttimassa kestää siis paremmin kulutusta kuin jatkuvalla rakeisuuskäyrällä tehty massa. Kiviaineksen ominaisuuksien lisäksi muun muassa päällysteen tyhjätila vaikuttaa nastarengaskulumiseen. Lisäksi sideaineen modifioinnilla on mahdollista parantaa jonkin verran nastarengaskulumiskestävyttä. (Lampinen 1993) Kuvassa 6 on esitetty nastarengaskulumiskestävyteen vaikuttavat päällysteen ominaisuudet.



Kuva 6. Nastarengaskulumiskestävyteen vaikuttavat päällysteen ominaisuudet.

Päällysteen nastarengaskulumiseen vaikuttavat päällysteen ominaisuuksien lisäksi liikenneolosuhteet. Kulumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat liikenteen määrä ja luonnollisesti myös nastarengasliikenteen osuus sekä renkaiden ominaisuudet, kuten nastojen määrä ja tyyppi sekä renkaiden laatu. Lisäksi tien geometria vaikuttaa päällysteen nastarengaskulumisen suuruuteen: kuluminen on suorilla osuuksilla pienempää kuin kaarteissa, kun taas jarrutusta ja kiihdytystä vaativilla tieosuuksilla kuluminen kasvaa. Nastarengaskuluminen voi siis vaihdella saman tien eri osuuksilla johtuen tien geometriasta. (Arrojo 2000) Liikenteen sijainti tien poikkileikkauksessa vaikuttaa nastarengasurien syvyyteen: mikäli liikenne kanalisoituu eli kulkee samassa kohdin kaistaa, urasyvyys ja päällysteen uusimistarve kasvavat. Liikenteen poikittaissijainnilla ei kuitenkaan ole suoraan vaikutusta kuluman määrään. (Unhola 2015)

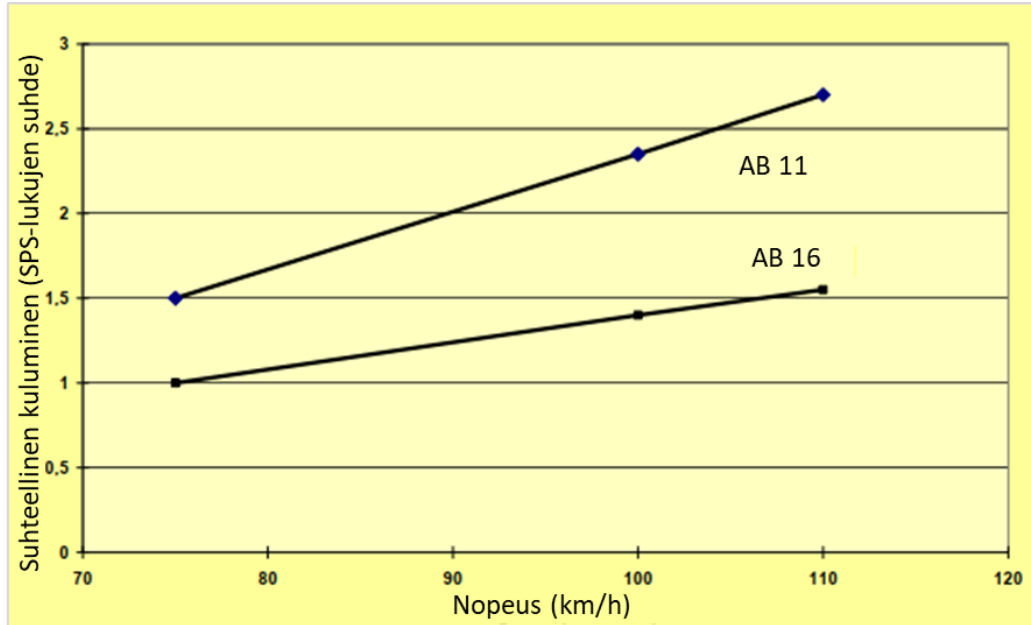
Liikennetekijöistä myös ajoneuvojen nopeus vaikuttaa päällysteen nastarengaskulumiseen: ajoneuvojen nopeuden kasvaessa päällysteeseen kohdistuva nastan iskuvoima suurenee ja siten myös kuluma suurenee (Lampinen 1993). Nopeuskasvun aiheuttamasta kulumisen suurenemisesta on kuitenkin eriäviä tulokintoja. Lampisen (1993) mukaan urasyvyys kasvaa eksponentiaalisesti nopeuden kasvaessa. Samansuuntaisia tuloksia on saatu yliajokokeessa, jossa uritetun ja kastellun kivilaatan yli ajetaan 400 kertaa nastarenkailla varustetulla autolla ja laatan kulumaa mitataan. Kokeessa kuluma ei kuitenkaan kasvanut 40 km/h nopeudesta jatkuvasti 120 km/h nopeuteen, vaan kuluman havaittiin olevan pienimmillään noin 80 km/h nopeudessa. (Unhola 2004) Tutkimuksessa havaittu suhde on esitetty kuvassa 7. Heikkisen (2012) tutkimuksen mukaan päällysteen nastarengaskulumisen minimi ei kuitenkaan olisi yliajokokeen havaintojen mukaisesti 60–80 km/h ajonopeudessa, vaan kulumisen vähenisi ajonopeuden funktiona myös alemmissa nopeuksissa.



Kuva 7. Nopeuden vaikutus kivilaatan kulumaan yliajokokeella mitattuna (Unhola 2004).

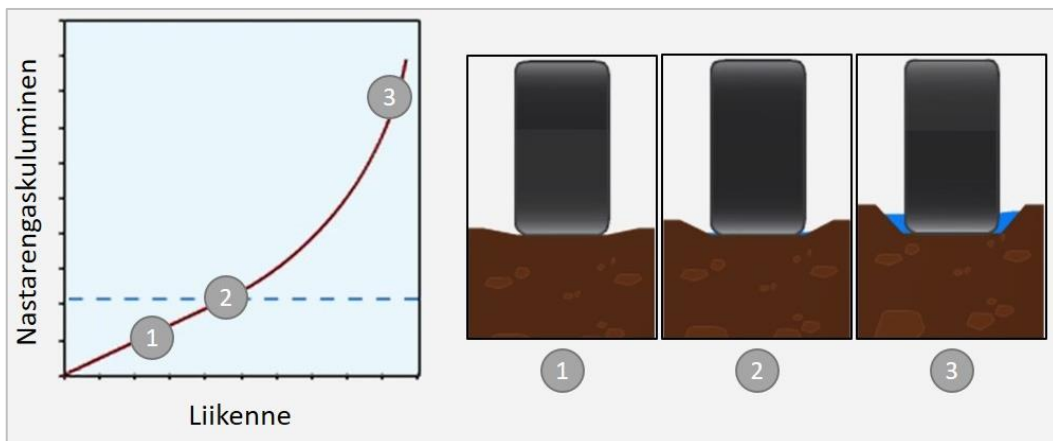
Toisaalta Jacobsonin ja Wågbergin (2007) mukaan päällysteen suhteellisen kuluman on havaittu kasvavan lineaarisesti ajonopeuden kasvaessa. Havaittu suhde kuluman ja nopeuden välille on esitetty kuvassa 8. Suhde vaikuttaisi olevan peräisin Wågbergin ja Hjalmarssonin (1989) minikoetietutkimuksessa havaittujen SPS-lukujen suhteesta. SPS-luvulla kuvataan yhden nastarenkailla varustetun ajoneuvon aiheuttamaa keskimääräistä päällysteen kulumaa massana ajokilometriä kohden (Heikkinen 2012).





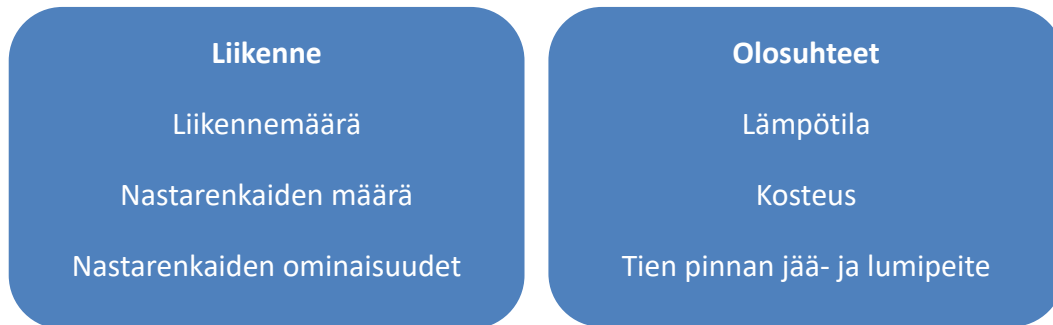
Kuva 8. Nopeuden vaikutus nastarengaskulumaan minikoetieillä mitattuna (muokattu lähteestä Jacobson & Wågberg 2007).

Myös ympäristöolosuhteet vaikuttavat päällysteen nastarengaskulumiseen. Lämpötila vaikuttaa bitumin kovuuteen ja mitä korkeampi lämpötila on, sitä helpommin päällyste kuluu. Toisaalta matalassa lämpötilassa bitumin plastiset ominaisuudet heikkenevät ja päällyste voi murtua. Lisäksi vesi lisää päällysteen kulumista heikentämällä sideaineen ja kiviaineksen välistä tartuntaa sekä kiviaineksen lujuutta. Vettä myös imeytyy mastiksiin, jolloin nastarengaskulumisen lisääntyy. (Arrojo 2000) Lampisen (1993) mukaan veden kulutusta lisäävää vaikutusta selittää nastan alla päällysteen huokosiin syntyvä, rakeita irrottava veden hydrostaattinen paine. Lisäksi kontaktin hiertovaihe on pidempi märällä kuin kuivalla päällysteellä johtuen pienemmästä kitkasta, eikä märän päällysteen päällä ole suojana hienoaainesta kuivan päällysteen tapaan (Lampinen 1993). Päällysteen nastarengaskulumisen kiihtyy veden vaikutuksesta ajan kuluessa: urasyvyyden kasvaessa uraan kerääntyy vettä ja uran kohta pysyy kosteana pidempään (ROADExa). Tämä on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Veden kiihdyttävä vaikutus nastarengaskulumiseen (muokattu lähteestä ROADExa).

Lisäksi päällysteen kosteusolosuhteisiin vaikuttaa tiesuolaus, sillä suolan vaikutuksesta vettä kerääntyy enemmän päällysteen pinnalle ja suola pitää päällysteen pinnan pidempään märkänä nastarenkaiden alla. Mikäli taas tietä ei suolata, suojaa jääpinta päällystettä nastarengaskulumiselta. (Arrojo 2000) Kuvaan 10 on koottu päällysteen nastarengaskulumiseen vaikuttavat ulkoiset tekijät.



Kuva 10. Päällysteen nastarengaskulumiseen vaikuttavat ulkoiset tekijät.

Nastarenkaiden kuluttavaa vaikutusta on pyritty vähentämään muun muassa rajoittamalla nastojen määrää, keventämällä nastoja, määrittämällä nastarenkaille sallittu käyttökausi sekä kehittämällä uusia nastatyypppejä (Lundberg et al 2019). Suomessa Liikenne- ja viestintäministeriön asetuksessa (466/2009) on määritetty sallittu nastojen lukumäärä ja asennustapa sekä tyyppihyväksynnän ehdot pistovoimasta ja nastan massasta. Toisaalta asetuksen 3 §:n mukaan vaatimuksista voidaan poiketa osoittamalla, ettei poikkeava nastarengas kuluta päällystettä enempää kuin sallittu nastarengas. Tieliikennelain (729/2018) mukaan 1.6.2020 alkaen nastarenkaita saa käyttää marraskuun alun ja maaliskuun lopun välisenä aikana. Aiemmin joului-, tammi- ja helmikuun aikana ollut talvi-rengaspakko siis muuttui Tieliikennelain päivityksen myötä keliperustaiseksi.

Norjassa ja Ruotsissa on pyritty vähentämään nastarenkaiden käyttöä lähinnä hengitysilman hiukkasten rajoittamiseksi. Norjassa on muutamassa kaupungissa käytössä nastarengasmaksut. Esimerkiksi Oslon alueella nastarenkailta varustetulla henkilöautolla ajamisesta täytyi maksaa 1.11.2019–19.4.2020 välisenä aikana vuorokaudessa noin 3,6 euroa tai koko nastarengaskaudesta noin 142 euroa (Oslo kommune). Ruotsissa taas on kielletty nastarenkaiden käyttö kokonaan tietyillä katuosuuksilla suurien kaupunkien keskustoissa. Kyseisillä kaduilla nastarenkaiden käyttö on vähentynyt, mutta toisaalta liikennettä on siirtynyt muille kaduille. (Toiskallio 2013) Myös Suomessa Tieliikennelain (729/2018) päivityksen myötä nastarenkailta varustetulla moottorikäyttöisellä ajoneuvolla ajaminen voidaan kieltää uudella liikennemerkillä. Kyseinen liikennemerkki on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Nastarenkailla ajo kielletty -liikennemerkki (Anderson 2016; Väylä 2019).

Myös nastojen kehityksellä voidaan vähentää päällysteen kulumista. Esimerkiksi Suomessa on äskettäin kehitetty kuminasta, jonka kuvataan kuluttavan päällystettä alumiinirunkoista nastaa vähemmän (Saarinen 2019).

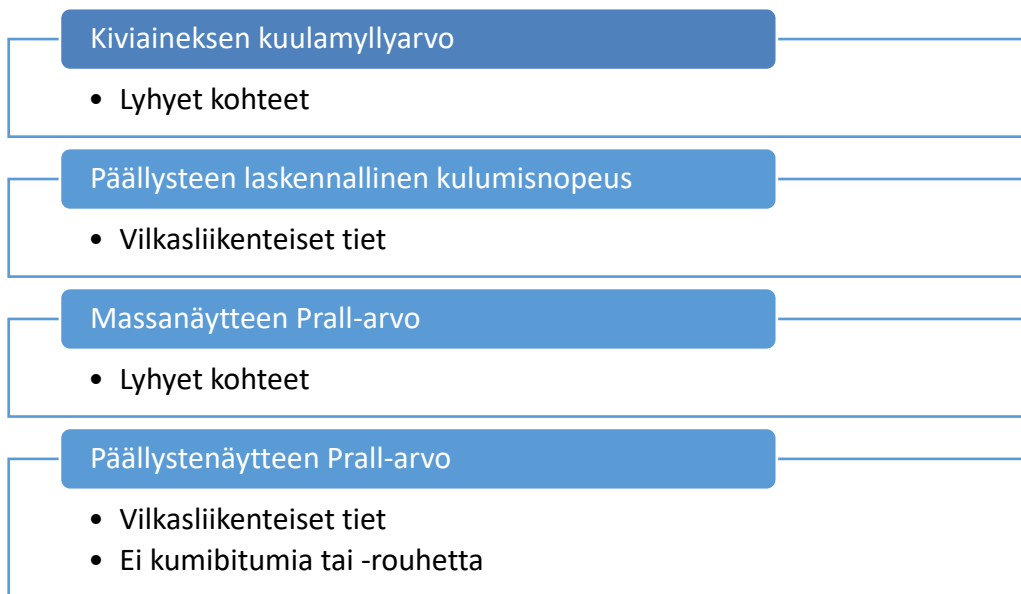
### 3 Päällysteelle asetettavat vaatimukset

Asfalttipäällysteen ominaisuuksien lähtökohtana on oikein suunniteltu asfalttimassa. Asfalttimassa voidaan suunnitella kokemusperäisesti tai toiminnallisesti. Kokemusperäisessä suunnittelussa määritetään ainoastaan asfalttimassan sideainepitoisuus ja rakeisuus. Tätä menetelmää käytetään vähemmän vaativissa kohteissa. Vaativammissa kohteissa taas käytetään toiminnallista suunnittelua, jossa määritetään edellä mainittujen lisäksi kiviaineksen tyhjätila, kiviaineksen tyhjätilan täyttöaste, päällysteen tyhjätila, tiivistettävyyden sekä vedenläpäisy. Vaativissa kohteissa asfalttimassalta voidaan vaatia myös tiettyjä toiminnallisia ominaisuuksia, kuten riittävää deformaatiokestävyyttä ja nastarengaskulumiskestävyyttä. Näiden toteutuminen arvioidaan ja testataan suunnitteluvaiheessa laboratoriossa. Asfalttimassan toiminnallisten vaatimusten täyttyminen osoitetaan tyyppitestausraportissa. (Asfalttinormit 2017)

#### 3.1 Vaatimukset nastarengaskulumiskestävyydelle

##### 3.1.1 Vaatimusten asettaminen

Päällysteen nastarengaskulumiskestävyyttä voidaan arvioida sekä kiviaineksen että asfalttimassan ominaisuuksien kautta. Kiviaineksen nastarengaskulumiskestävyys määritetään kuulamyllyarvolla ( $A_N$ ) standardin SFS-EN 1097-9 mukaisesti. Asfalttimassan kulumiskestävyys taas määritetään Prall-arvon perusteella standardin SFS-EN 12697-16 mukaisesti tai tietyissä tapauksissa SRK- eli sivurullakulumisarvon perusteella. (Asfalttinormit 2017) Nastarengaskulumiskestävyysvaatimus asetetaan ylimmälle päällystekerrokselle, ja tällä estetään päällystekerroksen liian nopea urautuminen. Vaatimusta asetettaessa määritetään ensin kohteessa käytettävä massatyyppi tai -tyypit ja lisäksi jokin kuvassa 12 esitetyistä vaatimuksista kohteen mukaan. (Liikennevirasto 2018)



Kuva 12. Nastarengaskulumiskestävyysvaatimuksen asettaminen eri käyttökohteissa (Liikennevirasto 2018).

### 3.1.2 Kuulamylyarvo ja päällysteen laskennallinen kulumisnopeus

Nastarengaskulutuskestävyysvaatimus voidaan asettaa määrittämällä kiviaineksen kuulamylyarvolle vaatimus. Tällöin määritetään yleensä myös yksi sallittu massatyyppi. (Liikennevirasto 2018) Kuulamylyarvo määritetään pohjoismaisella kuulamylytestillä standardin SFS-EN 1097-9 mukaisesti. Testi tehdään rakeisuudeltaan 11,2/16 mm kiviainekselle. Testissä kiviainesnäyte asetetaan pyörivään teräsrumpuun teräskuulien ja veden kanssa, ja samalla kiviaines kuluu ja hienonee. Tietyn kierrosmäärän jälkeen kiviaines seulotaan 2 mm seulalla ja lasketaan hienontuneen aineksen osuus suhteessa alkuperäisen kiviaineksen massa. (SFS-EN 1097-9 2014) Asfalttikiviaines jaotellaan Asfalttinormeissa (2017) kuulamylyarvon perusteella viiteen eri luokkaan. Nämä luokat on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Nastarengaskulutuskestävyysluokat (Asfalttinormit 2017).

Luokka	Kuulamylyarvo	Yksittäisen poikkeavan tuloksen enimmäisarvo
<b>A<sub>N</sub>7</b>	≤ 7,4	8,1
<b>A<sub>N</sub>10</b>	≤ 10,4	11,5
<b>A<sub>N</sub>14</b>	≤ 14,4	16,1
<b>A<sub>N</sub>19</b>	≤ 19,4	21,9
<b>A<sub>N</sub>30</b>	≤ 30,4	34,5

Toinen keino nastarengaskulutuskestävyysvaatimusta asetettaessa on määrittää päällysteen laskennallinen kulumisnopeus. Tässä menetelmässä huomioidaan edellisen menetelmän tapaan kiviaineksen kuulamylyarvo ja päällysteen massatyyppi. Menetelmä perustuu nastarengaskulumiskestävyudessa havaittuun yhteyteen asfalttimassan karkearakeisuuden ja kiviaineksen lujuuden välillä: lujuudeltaan heikompaa kiviainesta voidaan kompensoida valitsemalla massatyyppi, jossa on paljon karkeaa kiviainesta. Lisäksi menetelmässä huo-

mioidaan toimenpidekertoimella, tehdäänkö uutta päällystettä vai uusiopäällystettä. Päällysteen laskennallinen kulumisnopeus lasketaan kaavalla (Liikennevirasto 2018)

$$KN = TP \cdot MT \cdot (9,4 + 2,21 \cdot KM), \quad (1)$$

missä  $TP$  on toimenpidekerroin,  $MT$  massatyypikerroin ja  $KM$  kuulamylyarvo. Kertoimien lukuarvot on esitetty taulukossa 2.

*Taulukko 2. Päällysteen laskennallisen kulumisnopeuden kertoimet (Liikennevirasto 2018).*

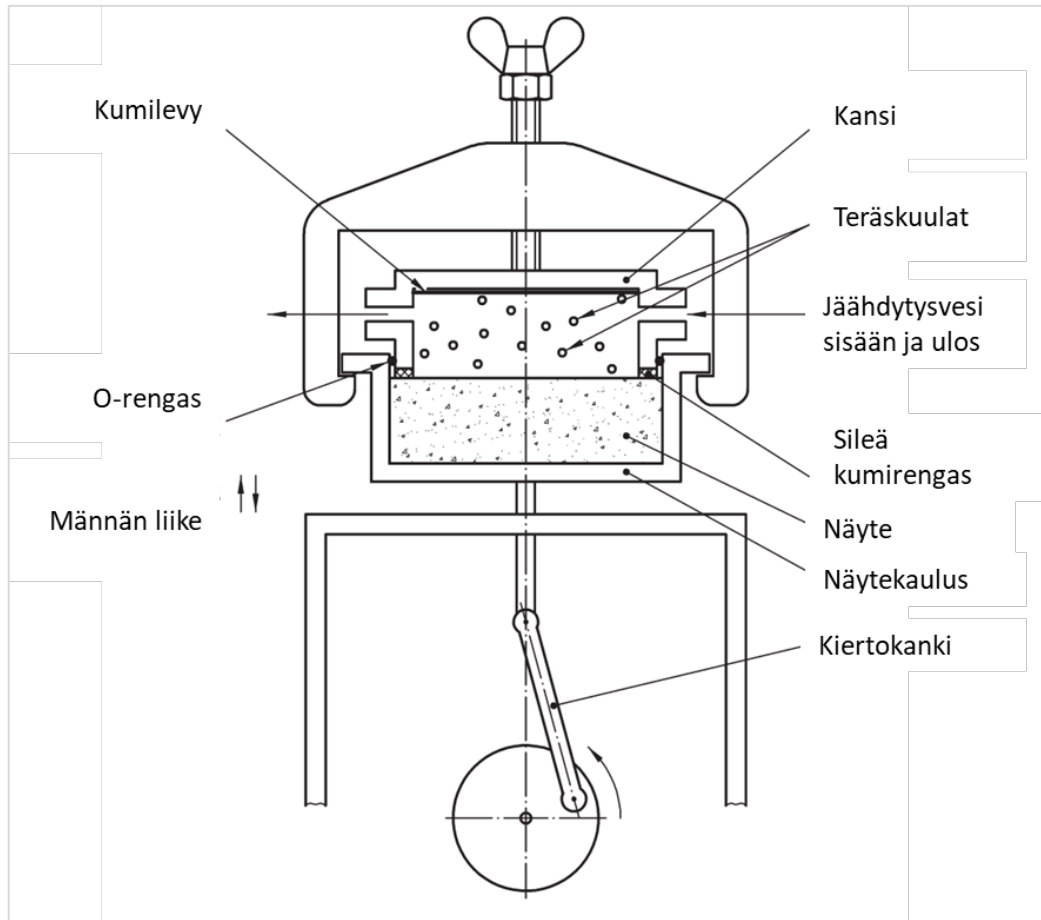
Kerroin	Selite	Arvo
<b>Toimenpidekerroin</b>	kerran REM	1,15
	kaksi kertaa REM	1,25
	uusi päällyste	1,00
<b>Massatyypikerroin</b>	AB 16	1,46
	AB 20-22	1,26
	SMA 16	1,08
	SMA 20-22	1,00

Kuulamylyarvon tai päällysteen kulumisnopeuden määrittämisen etuna on se, että nastarengaskulutuskestävyys saadaan määritettyä edullisilla testeillä useasta näytteestä. Tällöin myös kulutuskestävyyden hajonta saadaan selville. Kiviainekselle tehtävien testien tulokset eivät kuitenkaan välttämättä kuvaa kokonaan valmiin päällysteen kulumiskestävyyttä, johon vaikuttavat lisäksi käytetty sideaine sekä päällysteen tiiviys. (Liikennevirasto 2018)

### 3.1.3 Prall-arvo

Vaatus nastarengaskulumiskestävyydestä voidaan asettaa myös asfalttimassalle tai päällysteestä poratuille näytteille, jolloin käytetään Prall-menetelmällä saatavaa arvoa ( $A_{BrA}$ ). Asetettaessa vaatimus asfalttimassalle valmistetaan massaa suunniteltaessa laboratoriossa asfalttilaatta, josta porataan testattavat näytteet. Päällystenäytteet taas porataan tieltä jälkikäteen työn valmistuttua. (Liikennevirasto 2018) Prall-menetelmä on esitetty standardissa SFS-EN 12697-16 menetelmänä A. Prall-menetelmässä lieriömuotoista näytettä kulutetaan teräskuulilla 15 minuutin ajan ja kuluman suuruus saadaan näytteen tilavuuden vähenemisen perusteella millilitroina. Testissä ylläpidetään 5 °C lämpötila jäähdytysveden avulla. (SFS-EN 12697-16 2016) Prall-menetelmässä käytetyn laitteiston periaate on esitetty kuvassa 13.

Prall-menetelmää käsitellään tarkemmin kappaleessa 7.5. Taulukossa 3 on esitetty Prall-arvot, jotka voidaan esittää asfalttimassan CE-merkissä standardin SFS-EN 13108-1 (2016) mukaan.



Kuva 13. Prall-laitteiston periaate (muokattu lähteestä SFS-EN 12697-16 2016).

Taulukko 3. Prall-arvot, jotka voidaan esittää asfalttimassan CE-merkissä (SFS-EN 13108-1 2016).

Prall-arvo korkeintaan (ml)	Luokka
20	$Abr_{Amax20}$
24	$Abr_{Amax24}$
28	$Abr_{Amax28}$
32	$Abr_{Amax32}$
36	$Abr_{Amax36}$
40	$Abr_{Amax40}$
45	$Abr_{Amax45}$
50	$Abr_{Amax50}$
ei vaatimusta	$Abr_{AmaxNR}$

Asfalttinormeissa on esitetty taulukon 4 mukaiset luokat päällysteen kulumis-kestävyydelle Prall-menetelmää käytettäessä. Luokka saadaan Prall-menetelmän tulosten keskiarvon avulla. (Asfalttinormit 2017)

Taulukko 4. Kulumiskestävyyssluokat Prall-menetelmää käytettäessä (Asfalttinormit 2017).

Laboratorionäytteet Kulumisluokka	Prall-arvo (ml)	Abr <sub>A</sub>	Tieltä poratut näytteet Kulumisluokka	Prall-arvo (ml)	Abr <sub>A</sub>
<b>Abr<sub>A20</sub></b>	≤ 20		I	≤ 22	
<b>Abr<sub>A28</sub></b>	≤ 28		II	≤ 30	
<b>Abr<sub>A36</sub></b>	≤ 36		III	≤ 38	
<b>Abr<sub>A45</sub></b>	≤ 45		IV	≤ 46	

Taulukosta 4 ilmenee, että tieltä poratuille näytteille sallitaan hieman suuremmat Prall-arvot kuin laboratorionäytteille. Laboratoriossa valmistetut näytteet testataan sahatulta pinnalta, kun taas tieltä otetut näytteet sahaamattomalta pinnalta (SFS-EN 12697-16 2016). Tieltä otettavien näytteiden etuna on, että saadaan selville näytteiden edustama tieosuus ja näytteenottoa voidaan tarvittaessa painottaa halutuille osuuksille (Liikennevirasto 2018).

Prall-vaatimus voidaan asettaa asfalttikiviaineksen kuulamylyarvon ja massatyypin perusteella. Taulukossa 5 on esitetty esimerkit asfalttimassan kulumiskestävyyksvaatimuksista eri massatyypin ja kahden kuulamylyluokan perusteella. (Asfalttinormit 2017)

Taulukko 5. Prall-luokan valinta kuulamylyarvon ja massatyypin mukaan (Asfalttinormit 2017).

Massatyyppi	A <sub>N</sub> 7	A <sub>N</sub> 10
<b>AB 11</b>	Abr <sub>A36</sub>	Abr <sub>A45</sub>
<b>AB 16</b>	Abr <sub>A28-A36</sub>	Abr <sub>A36-A45</sub>
<b>AB 22</b>	Abr <sub>A28</sub>	Abr <sub>A36</sub>
<b>SMA 11</b>	Abr <sub>A28</sub>	Abr <sub>A36</sub>
<b>SMA 16</b>	Abr <sub>A20-A28</sub>	Abr <sub>A28-A36</sub>
<b>SMA 22</b>	Abr <sub>A20</sub>	Abr <sub>A28</sub>

Taulukon 5 perusteella SMA 16 -päällysteelle soveltuva Prall-vaatimus voisi esimerkiksi olla Abr<sub>A20</sub> tai Abr<sub>A28</sub> käytettäessä kuulamylyluokan A<sub>N</sub>7 kiviainesta.

Kulumiskestävyyksvaatimuksen asettamisessa voidaan myös hyödyntää Prall-arvon ja päällysteen laskennallisen kulumisnopeuden välistä yhteyttä. Laboratoriossa valmistetusta asfalttilaatasta poratulle näytteelle yhteys on (Liikennevirasto 2018)

$$PRALL_{MASSA} = KN - 6, \quad (2)$$

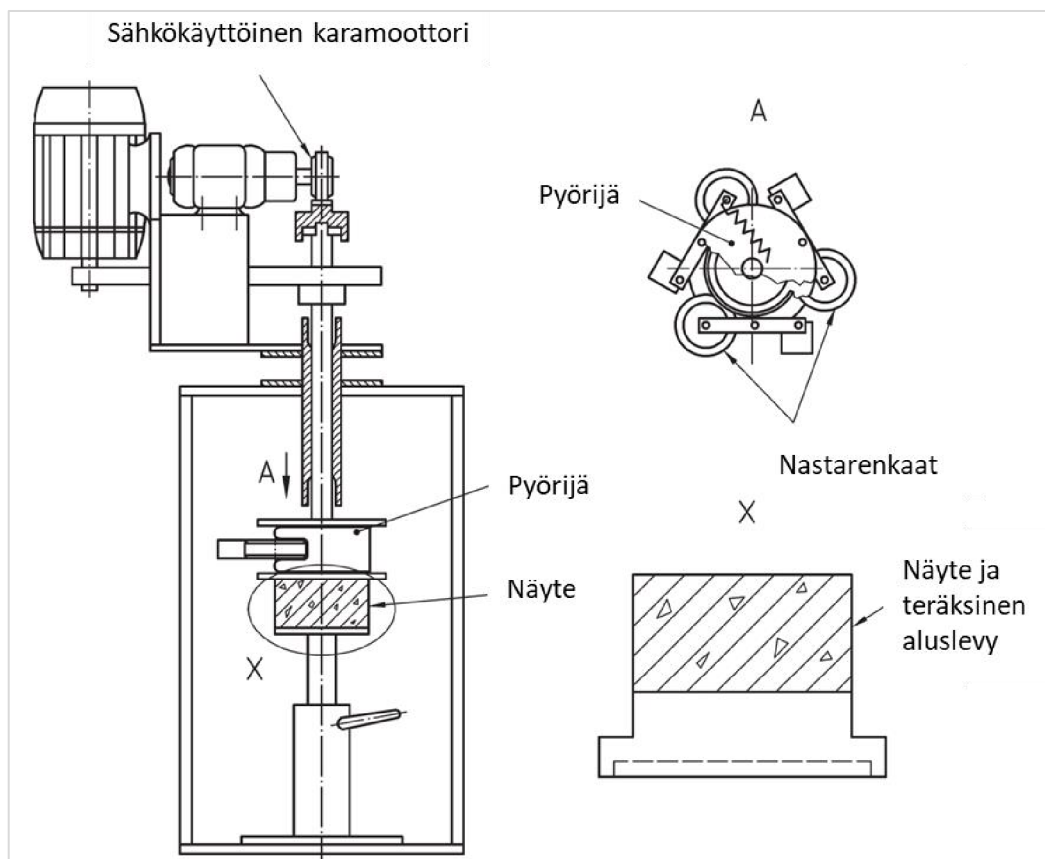
missä  $KN$  laskennallinen kulumisnopeus. Tieltä poratulle näytteelle vastaava yhteys taas on (Liikennevirasto 2018)

$$PRALL_{TIE} = KN - 4 \quad . \quad (3)$$



### 3.1.4 SRK-arvo

Prall-arvon lisäksi asfalttimassan kulumiskestävyyttä voidaan arvioida SRK-arvolla ( $Abr_B$ ). SRK-menetelmä on esitetty standardissa SFS-EN 12697-16 menetelmänä B. Menetelmässä lieriönmuotoista päällystenäytettä kulutetaan sivusuunnasta kolmella nastarenkaalla kahden tunnin ajan ja Prall-menetelmän tapaan kuluma ilmoitetaan millilitroina. Renkaista yksi kuluttaa näytettä kohtisuoraan ja kaksi muuta rengasta 5 asteen kulmassa. (SFS-EN 12697-16 2016) SRK-menetelmässä tutkittavan näytteen korkeuden tulee olla vähintään 50 mm (Asfalttinormit 2017). SRK-laite on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. SRK-laitteisto (muokattu lähteestä SFS-EN 12697-16 2016).

Asfalttinormien (2017) mukaan SRK-menetelmää käytetään nykyään vain, kun päällyste sisältää modifioitua sideainetta. Kumia sisältäville asfalttimassoille menetelmä ei kuitenkaan sovellu standardin SFS-EN 12697-16 (2016) mukaan. Asfalttinormeissa on esitetty taulukon 6 mukaiset luokat päällysteen kulumiskestävyydelle SRK-menetelmää käytettäessä. Luokat ovat samat sekä laboratoriossa valmistetuille että tieltä poratuille näytteille. (Asfalttinormit 2017)

Taulukko 6. Kulumiskestävyydsuokat SRK-menetelmää käytettäessä (Asfalttinormit 2017).

Kulumisluokka	SRK-kuluma $Abr_B$ (ml)
$Abr_{B28}$	$\leq 28$
$Abr_{B37}$	$\leq 37$
$Abr_{B46}$	$\leq 46$
$Abr_{B55}$	$\leq 55$

Käytännössä SRK-menetelmää ei kuitenkaan käytetä nykyään nastarengaskulumiskestävyysarvioinnissa. Standardin SFS-EN 13108-20 (2016) mukaan SRK-menetelmää ei voi käyttää asfalttimassan tyyppitestauksessa eikä asfalttimassan CE-merkintään voi määrittää nastarengaskulumiskestävyyttä standardin SFS EN 13108-1 (2016) mukaan SRK-menetelmällä, vaan molemmissa tapauksissa käytetään Prall-menetelmää. Myöskään esimerkiksi *Tierakenteen suunnittelu* -ohjeessa ei käsitellä SRK-menetelmää nastarengaskulumiskestävyysvaatimuksen asettamistapojen yhteydessä (Liikennevirasto 2018).

### 3.2 Vaatimukset kiviaineksen muodolle

Myös asfalttikiviaineksen muodolle voidaan asettaa vaatimus. Kiviaineksen muoto-ominaisuuksia kuvataan litteysluvulla (FI), joka määritetään standardin SFS-EN 993-3 mukaan. Menetelmässä kiviaines seulotaan ensin standardin mukaisiin raekokolajitteisiin. Tämän jälkeen raekokolajitteet seulotaan välppäseulalla, jossa aukkokoon suuruus on puolet kunkin lajitteen ylärajasta. Seulaa läpäissyt massa punnitaan ja litteysluku saadaan laskemalla läpäisseiden rakeiden osuus näytteen kuivamassasta. (SFS-EN 993-3 2012) Asfalttikiviaines luokitellaan neljään litteyslukuluokkaan, ja luokka lasketaan asfalttimassan kiviainesyhdistelmälle. Yksittäisen lajitteen litteysluvun tulee olla vähintään 3. (Asfalttinormit 2017) Asfalttinormien mukaiset litteyslukuluokat on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Litteyslukuluokat (Asfalttinormit 2017).

Litteyslukuluokka	Litteysluvun arvo
FI <sub>10</sub>	≤ 10
FI <sub>15</sub>	≤ 15
FI <sub>20</sub>	≤ 20
FI <sub>35</sub>	≤ 35

Asfalttinormeissa (2017) on esitetty alustavat valintaperusteet kiviaineksen litteysluvulle ja kuulamylyarvolle liikennemäärän, nopeusrajoituksen ja asfalttityypin perusteella. Taulukossa 8 on esitetty valintaperusteet AB- ja SMA-päällysteille.

Taulukko 8. Kiviaineksen alustavat valintaperusteet (muokattu lähteestä Asfalttinormit 2017).

Nopeusrajoitus	Liikennemäärä (autoa/vrk)				
≥ 80 km/h	<1000	1000-2000	2000-5000	5000-10000	>10000
< 80 km/h	<1500	1500-3000	3000-7500	7500-15000	>15000
Asfalttityyppi	Kuulamyly- ja litteyslukuluokka				
AB	A <sub>N</sub> 30 FI <sub>35</sub>	A <sub>N</sub> 19 FI <sub>35</sub>	A <sub>N</sub> 14 FI <sub>20</sub>	A <sub>N</sub> 10 FI <sub>15</sub> -FI <sub>10</sub>	A <sub>N</sub> 7 FI <sub>15</sub> -FI <sub>10</sub>
SMA	-	-	A <sub>N</sub> 10 FI <sub>15</sub>	A <sub>N</sub> 10 FI <sub>15</sub>	A <sub>N</sub> 7 FI <sub>15</sub> -FI <sub>10</sub>

*Tierakenteen suunnittelu* -ohjeen (2018) mukaan taulukossa 8 esitettyjä alustavia valintaperusteita sovelletaan vaatimuksina, mikäli tilaaja ei aseta muita vaatimuksia kiviaineksen nastarengaskulutuskestävyydelle.

### 3.3 Vaatimukset muissa Pohjois-Euroopan maissa

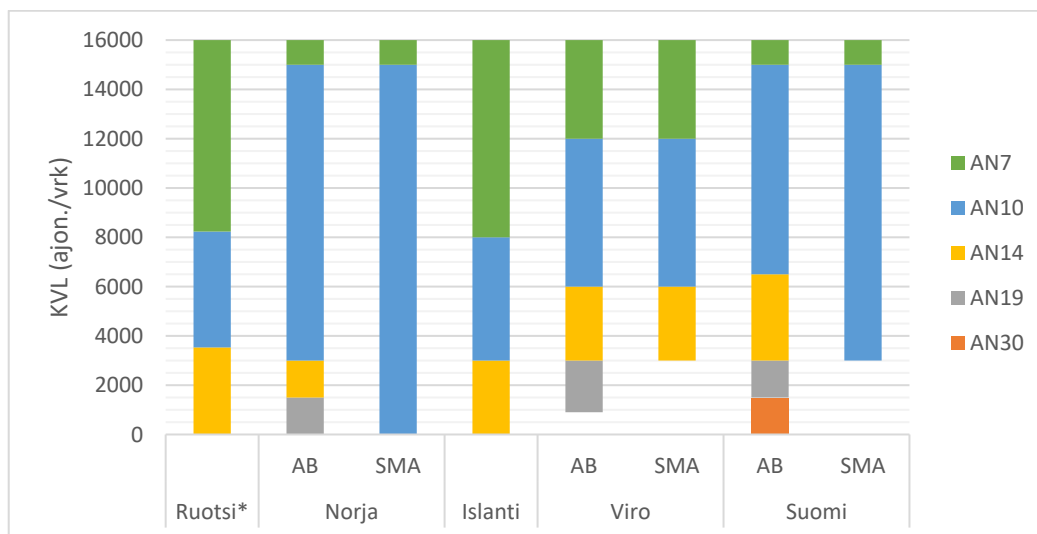
Kiviaineksen kulutuskestävyydelle ja muodolle sekä päällysteen kulumiskestävyydelle on asetettu vaatimuksia myös muissa Pohjois-Euroopan maissa. Taulukossa 9 on esitetty Ruotsin, Norjan, Islannin, Viron ja Suomen kansallisissa ohjeissa esitetyt keskimääräiset vuorokausiliikennemäärät (KVL), joiden perusteella asfalttikiviaineksen kuulamylyarvovaatimus voidaan asettaa.

*Taulukko 9. Keskimääräiset vuorokausiliikennemäärät eri kuulamylyarvovaatimuksille kansallisten ohjeiden perusteella (muokattu lähteistä Trafikverket 2017; Statens vegvesen 2018; Vegagerðin 2020; Maanteemat 2015; Asfalttinormit 2017).*

Maa	Asfalttityyppi	A <sub>N</sub> 30	A <sub>N</sub> 19	A <sub>N</sub> 14	A <sub>N</sub> 10	A <sub>N</sub> 7
<b>Ruotsi</b> (*mukautettu kaistakohtainen)	AB & SMA			< 1 500*	1 500–3 500*	> 3 500*
<b>Norja</b>	AB		< 1 500	1 500–3 000	3 000–15 000	> 15 000
	SMA				< 15 000	> 15 000
<b>Islanti</b>	AB & SMA		< 300 (<70 km/h)	3 000–8 000 (<70 km/h) < 3 000 (>70 km/h)	8 000–15 000 (<70 km/h) 3 000–8 000 (>70 km/h)	> 15 000 (<70 km/h) > 8 000 (>70 km/h)
<b>Viro</b>	AB		900–3000	3 000–6 000	6 000–12 000	> 12 000
	SMA			3 000–6 000	6 000–12 000	> 12 000
<b>Suomi</b>	AB	< 1 500 (<80 km/h) < 1 000 (≥80 km/h)	1 500–3 000 (<80 km/h) 1 000–2 000 (≥80 km/h)	3 000–7 500 (<80 km/h) 2 000–5 000 (≥80 km/h)	7 500–15 000 (<80 km/h) 5 000–10 000 (≥80 km/h)	> 15 000 (<80 km/h) > 10 000 (≥80 km/h)
	SMA				3 000–15 000 (<80 km/h) 2 000–10 000 (≥80 km/h)	> 15 000 (<80 km/h) > 10 000 (≥80 km/h)

Taulukossa 9 esitetty Ruotsin liikennemäärä on keskimääräinen kaistakohtainen liikennemäärä vuorokaudessa, joka on mukautettu kertomalla määrä nastarengasosuus-, nopeus-, leveys- ja suolauskertoimilla (Trafikverket 2017). Muut taulukossa esitetyt liikennemäärät ovat koko tien liikennemääriä. Erona on kuitenkin Islannissa ja Norjassa liikennemääränä käytettävä suunnitteluvuoden liikennemäärä, kun taas Virossa kulutuskerroksen käyttöänsä lopussa eli 7–12 vuoden päästä oleva liikennemäärä. (Statens vegvesen 2018; Vegagerðin 2020; Maanteemat 2015)

Taulukosta 9 ilmenee, että kansallisten ohjeiden perusteella kuulamylyarvovaatimukset ovat tiukimmat Ruotsissa, jossa vähiten liikennöidyilläkin väylillä vaatimuksena on kuulamylyarvo  $A_{N14}$ . Myös Islannissa nopeakajatuksen ollessa yli 70 km/h vaaditaan vähäisilläkin liikennemäärillä kiviainekselta vähintään kuulamylyarvoa  $A_{N14}$ . Kulutuskestävyydeltään parasta  $A_{N7}$ -luokan kiviainesta vaaditaan eri maissa vaihtelevilla liikennemäärillä: Ruotsissa  $A_{N7}$ -kiviainesta vaaditaan mukautetun kaistakohtaisen liikennemäärän ollessa 3 500 ajoneuvoa vuorokaudessa, kun taas Norjassa vastaava vaatimus asetetaan koko tien liikennemäärän ollessa 15 000 ajoneuvoa vuorokaudessa. Kuvan 15 kuvassa on esitetty Suomen, Norjan, Islannin ja Viron liikennemäärät kuulamylyarvovaatimuksille kansallisten ohjeiden perusteella nopeakajatuksen ollessa 80 km/h. Kuvassa on myös esitetty Ruotsin liikennemäärät olettaen, että tie on kaksikaistainen ja nopeakajainta lukuun ottamatta muut kertoimet saavat arvon 1,0. Nopeuskerroin on 0,85 nopeakajatuksen ollessa 80 km/h (Trafikverket 2011).



Kuva 15. Kuulamylyarvovaatimusten asettaminen tien KVL:n ja kansallisten ohjeiden perusteella nopeakajatuksen ollessa 80 km/h (\*Ruotsin arvot on arvioitu mukautetun kaistakohtaisen liikennemäärän perusteella).

Myös asfalttikiviaineksen litteysluvulle on eri maiden kansallisissa ohjeissa esitetty vaatimukset liikennemäärän perusteella. Nämä liikennemäärät on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Keskimääräiset vuorokausiliikennemäärät eri litteyslukuvaatimuksille kansallisten ohjeiden perusteella (muokattu lähteistä Trafikverket 2017; Statens vegvesen 2018; Vegagerðin 2020; Maanteeamet 2015; Asfalttinormit 2017).

Maa	Asfalttityyppi	Fl <sub>35</sub>	Fl <sub>25</sub>	Fl <sub>20</sub>	Fl <sub>15</sub>	Fl <sub>10</sub>
<b>Ruotsi</b> (*mukautettu kaistakohtainen)	AB		< 7 000* (≤8 mm)	< 7 000* (>8 mm)		
	SMA		< 3 500* (≤8 mm)	> 3 500* (≤8 mm) < 3 500* (>8 mm)	> 3 500* (>8 mm)	
<b>Norja</b>	AB		< 1 500	> 1 500		
	SMA			Aina		
<b>Islanti</b>	AB & SMA		< 3 000	3 000–15 000	> 15 000	
<b>Viro</b>	AB		< 900	900–3 000	3 000–6 000  > 6 000 (<10% raskasta liikennettä)	> 6 000 (>10% raskasta liikennettä)
	SMA				3 000–6 000	> 6 000
<b>Suomi</b>	AB	< 3 000 (<80 km/h) < 2 000 (≥80 km/h)		3 000–7 500 (<80 km/h) 2 000–5 000 (≥80 km/h)	7 500–15 000 (<80 km/h) 5 000–10 000 (≥80 km/h)	> 15 000 (<80 km/h) >10 000 (≥80 km/h)
	SMA				3 000–15 000 (<80 km/h) 2 000–10 000 (≥80 km/h)	> 15 000 (<80 km/h) >10 000 (≥80 km/h)

Taulukosta 10 ilmenee, että vilkkaimmin liikennöidyillä väylillä Suomessa ja Virossa asetetaan kansallisten ohjeiden perusteella tiukemmat litteyslukuvaatimukset kuin muissa maissa. Ruotsissa, Norjassa ja Islannissa ei kansallisten ohjeiden perusteella vaadita ollenkaan litteyslukuluokkaa Fl<sub>10</sub> liikennemäärään pohjautuen. Lisäksi esimerkiksi Fl<sub>15</sub>-litteyslukuluokan raja on Islannissa 15 000 ajoneuvoa vuorokaudessa, kun taas Suomessa sitä voidaan vaatia jo 2 000 ajoneuvon liikennemäärällä. Suomessa taas litteyslukuvaatimus ei ole kovin tiukka kansallisten ohjeiden perusteella vähiten liikennöidyillä väylillä verrattuna muihin maihin: Suomessa vaatimuksena on litteyslukuluokka Fl<sub>35</sub>, kun taas muissa maissa vaaditaan vähintään litteyslukuluokkaa Fl<sub>25</sub>.

Lisäksi Suomen ja muiden maiden asfalttikiviainesvaatimuksissa erona on iskunkestävyysvaatimus. Ruotsissa, Norjassa, Islannissa ja Virossa asetetaan kansallisten ohjeiden perusteella vaatimus asfalttikiviaineksen Los Angeles -luvulle: vaatimukset vaihtelevat liikennemäärän perusteella välillä LA<sub>15</sub>–LA<sub>40</sub> (Trafikverket 2017; Statens vegvesen 2018; Vegagerðin 2020; Maanteeamet 2015).

Suomessa Los Angeles -lukua käytetään tierakenteissa vain sitomattomien rakennekerrosten kiviainesten laadunarvioinnissa.

Prall-vaatimuksia on esitetty eri maiden kansallisissa ohjeissa vaihtelevasti. Ruotsin kansallisessa ohjeessa on esitetty Prall-arvolle vaatimus, mikäli käytetään uusioasfalttia tieosuudella, jonka mukautettu kaistakohtainen liikennemäärä on yli 7 000 ajoneuvoa vuorokaudessa. Tällöin laboratoriossa valmistettujen näytteiden Prall-arvo tulee olla SMA 16:lla korkeintaan 20 ml ja SMA 11:lla korkeintaan 24 ml. Muita liikennemäärään perustuvia Prall-vaatimuksia Ruotsin vuonna 2017 julkaistussa kansallisessa ohjeessa ei ole esitetty. (Trafikverket 2017) Norjan uusimmassa kansallisessa ohjeessa ei ole esitetty vaatimuksia Prall-arvolle (Statens vegvesen 2018). Aiemmassa vuonna 2014 julkaistussa kansallisessa ohjeessa oli neljä eri Prall-luokkaa kohteen keskimääräisen vuorokausiliikenteen perusteella valmiista päällysteestä porattaville näytteille. Näytteiden määrä tuli arvioida kohteen vaativuuden mukaan. (Statens vegvesen 2014) Norjan vuoden 2014 kansallisessa ohjeessa esitetyt Prall-vaatimukset on esitetty taulukossa 11.

*Taulukko 11. Prall-vaatimukset Norjassa vuoden 2014 kansallisen ohjeen perusteella (Statens vegvesen 2014).*

Liikennemäärä (autoa/vrk)	<3 000	3 000–5 000	5 000–10 000	>10 000
Norja (vuonna 2014)	36 ml	28 ml	25 ml	22 ml

Islannin ja Viron kansallisissa ohjeissa sen sijaan on esitetty päällysteen kulumiskestävyydelle vaatimukset liikennemäärän perusteella. Islannin ja Viron kansallisten ohjeiden Prall-vaatimukset on esitetty taulukossa 12.

*Taulukko 12. Prall-vaatimukset Islannissa ja Virossa kansallisten ohjeiden perusteella (Vegagerðin 2020; Maanteeamet 2015).*

Maa	Asfalttityyppi	Liikennemäärä (autoa/vrk)			
		8 000–30 000	>30 000		
Islanti		24 ml	20 ml		
		1 500–3 000	3 000–6 000	6 000–12 000	>12 000
Viro	AB	50 ml	40 ml	36 ml	32 ml
	SMA		36 ml	32 ml	24 ml

## 4 Nastarengaskulumiskestävyyden mittausmenetelmien kehittyminen

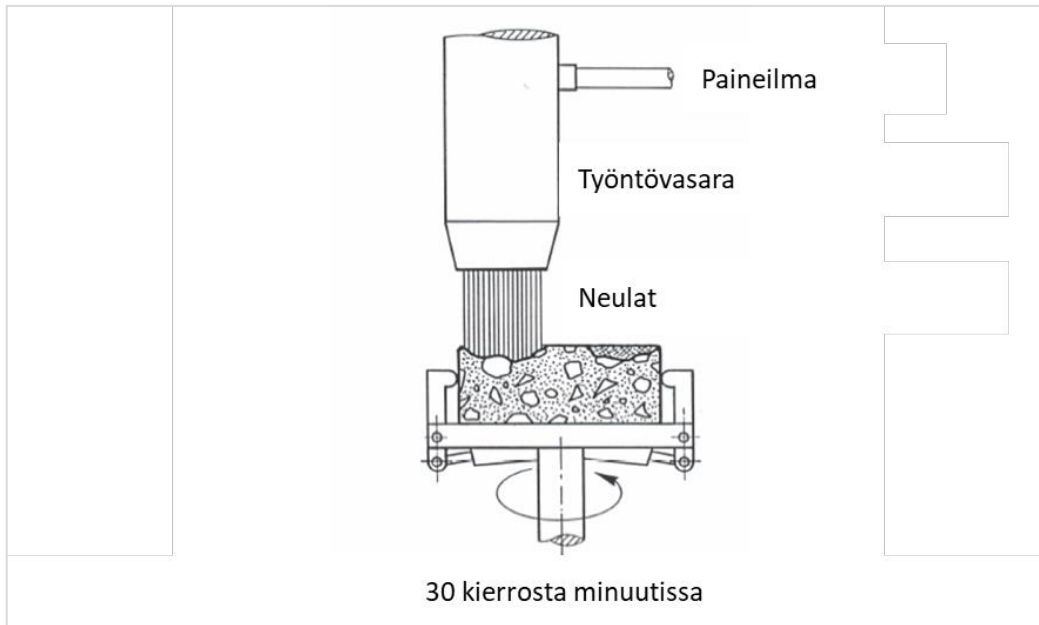
### 4.1 Taustaa

Päällysteen nastarengaskulumisen simuloimiseksi on käytetty Suomessa kehitettyä SRK-menetelmää ja Ruotsissa kehitettyä Prall-menetelmää. Menetelmien kehitys aloitettiin 1990-luvun alussa. Suomessa keskityttiin SRK-menetelmän ja tiekuluman korrelaation sekä SRK-menetelmän tulokseen vaikuttavien tekijöiden tutkimiseen, kun taas Ruotsissa tutkittiin Prall-menetelmän ja tiekuluman korrelaatiota sekä Prall-menetelmän tulokseen vaikuttavia tekijöitä. Molemmissa maissa on myös tutkittu Suomen ja Ruotsin menetelmien välistä korrelaatiota sekä nastarengaskulumisen simulointia saksalaisella Tröger-laitteella.

Suomen ja Ruotsin menetelmissä haasteena on ollut se, että päällysteen kulumista mitattaessa myös laitteet ovat kuluneet ja tulokset eivät siten ole olleet enää luotettavia. Menetelmien luotettavuutta voidaan arvioida laskemalla vertailukokeiden perusteella toistettavuus ja uusittavuus. Toistettavuus kuvaa saman laitteen mittauksien vaihtelua samassa laboratoriossa ja uusittavuus taas laitteiden ja laboratorioiden välistä vaihtelua: mitä suurempia ovat toistettavuuden ja uusittavuuden arvot, sitä suurempi on menetelmien hajonta.

#### 4.1.1 SRK-menetelmä Suomessa

Suomessa Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) kehitti päällysteiden nastarengaskulumiskestävyyden arviointiin SRK-menetelmän. SRK-menetelmän lisäksi Suomessa päällysteen nastarengaskulumista on arvioitu saksalaisella Tröger-laitteella, jossa paineilmalla toimivan työntövasaran neuloilla isketään päällystenäytteen pintaa 15 minuutin ajan. (Kurki et al 1992) Tröger-testissä näyte pyörii nopeudella 30 kierrosta minuutissa ja näytteen keskelle jää kuluttamaton alue. Testin aikana kulunutta ainesta poistetaan esimerkiksi imulla. (PANK ry 1995b) Tröger-menetelmä kehitettiin Länsi-Saksassa 1970-luvun alussa, ja tällöin menetelmä esitettiin myös saksalaisissa ohjeissa (Jacobson & Viman 1996). Tröger-laite on esitetty kuvassa 16.



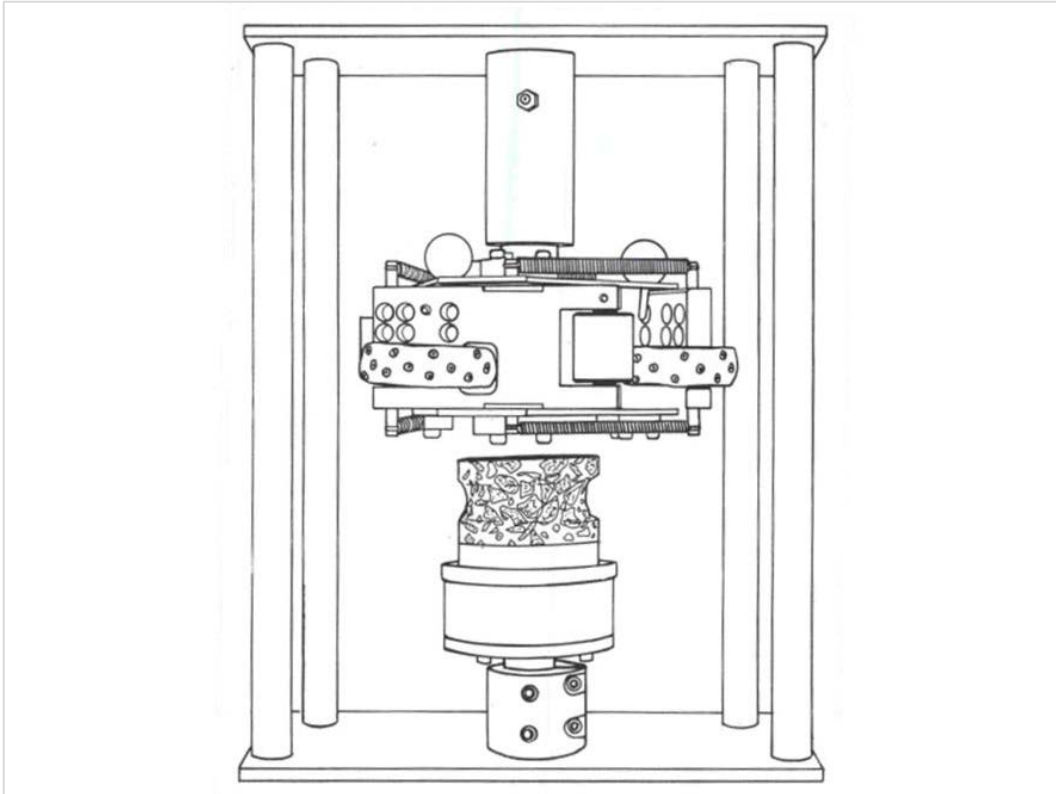
Kuva 16. Tröger-laite (muokattu lähteestä PANK ry 1995b).

Vuonna 1992 Turun tiepiirissä tutkittiin SRK-laitteen korrelaatiota tiekulumiin. Tutkimuksessa SRK-arvon ja koelaatoissa tapahtuvan tiekuluman välillä havaittiin vahva korrelaatio. (Mannonen 1992) Samaan aikaan ASTO-projektissa tutkittiin SRK-arvojen ja koetiekulumien välistä korrelaatiota. Tutkimus perustui kolmen talven aikana tehtyihin havaintoihin kahdeltatoista koetieltä. Suhteellisen tiekuluman ja suhteellisen SRK-kuluman väliseksi korrelaatioksi saatiin 0,85. Suhteellisella SRK-kulumalla tarkoitettiin SRK-arvon suhdetta saman tien referenssimassojen keskiarvoon nähden. ASTO-projektissa yhdellä koetiellä vertailtiin myös Tröger- ja SRK-laitteiden korrelaatiota tiekuluman kanssa. SRK-laitteen ja tiekuluman välillä havaittiin hieman parempi korrelaatio kuin Tröger-laitteen ja tiekuluman välillä, mutta ero oli kuitenkin pieni. (ASTO-loppuraportti 1993) Lisäksi tutkimuksessa havaittiin SRK- ja Tröger-laitteiden tulosten välillä epälineaarinen yhteys, sillä Tröger-menetelmässä näytteen kuluminen hidastui kappaleen kuluessa (Kurki et al 1992).

Vuonna 1993 Suomessa oli käytössä kahdeksan SRK-laitetta: VTT:lla oli kolme laitetta, Tielaitoksella kaksi laitetta sekä yhdet laitteet Tampereen teknillisellä korkeakoululla (TTKK), Teknillisellä korkeakoululla (TKK) ja Lemminkäinen Oy:lla. Osa päällystysurakoista toteutettiin laatuvaraus-urakoina, joissa urakoitsija esitti tarjouksessa SRK-arvon ja työn valmistumisen jälkeen testatun SRK-arvon mahdollisen poikkeaman myötä urakoitsijalle määrättiin joko sakko tai hyvitys urakkahintaan. Laitteiden tuloksissa oli kuitenkin havaittu olevan hajontaa, joten vuonna 1993 tutkittiin kahdeksan laitteen tulosten hajontaa sekä hajontaa aiheuttavia tekijöitä. Tutkimuksessa näytteet porattiin tieltä, mutta hajontaa pienennettiin hylkäämällä osa kappaleista silmämääräisesti ja osa tyhjätilapoikkeamien perusteella. Tutkittavia massoja olivat AB 18, SMA 18 sekä REM-menetelmällä tehty uusiopäällyste. (Niemeläinen 1994) REM-menetelmässä tien vanha päällyste kuumennetaan, jyrsitään ja sekoitetaan uuden massan kanssa ja syntynyt uusiomassa levitetään takaisin tielle (Tiehallinto 2002). Tutkimuksessa nousi esiin hajontaa aiheuttaviksi tekijöiksi erot laitteen näytettä kuluttavien renkaiden kuluneisuudessa, renkaita näytteeseen puristavissa joussissa ja näytteen tilavuuden muutoksen määrittämisessä. Ongelmaksi havaittiin



myös kokeiden epäonnistuminen muun muassa jousen katkeamisen vuoksi. (Niemeläinen 1994) Tutkimuksessa menetelmän toistettavuudeksi saatiin 15 % ja uusittavuudeksi 18 % (Laaksonen et al 2008). SRK-laitteen periaatekuva on esitetty kuvassa 17.

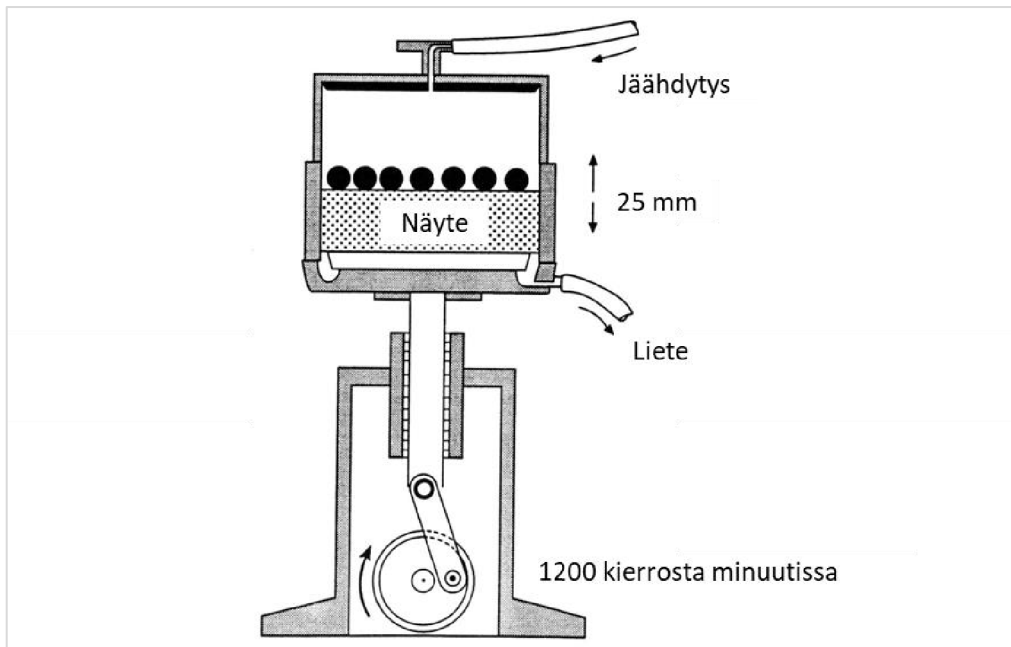


Kuva 17. SRK-laitte vuonna 1993 (Niemeläinen 1994).

Vuoden 1994 Asfalttinormeissa jaoteltiin päällysteet neljään kulumisluokkaan SRK-arvon perusteella (Asfalttinormit 1994). SRK-laitteen heikkoutena oli se, että sillä ei voitu tutkia ohuita päällysteitä. Tämän vuoksi vuonna 1995 tutkittiin SRK-näytteiden valmistamista liimaamalla kaksi ohuesta päällysteestä porattua kappaletta yhteen. Tutkimuksessa liimaamisella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta SRK-arvoon, joten menetelmää todettiin voitavan käyttää tällä tavoin myös ohuempien päällysteiden tutkimiseen. Lisäksi tutkittiin SRK- ja Tröger-laitteiden tulosten välistä korrelaatiota. Tutkimuksessa havaittiin korrelaatio laitteiden välillä, ja Tröger-laitteella saataville arvoille laadittiin SRK-luokkia vastaavat luokat. SRK-vaatimusten soveltuvuutta arvioitiin kahden urakan tulosten pohjalta ja vaatimukset havaittiin toimiviksi. (Kollanen 1995) Vuonna 1995 tehtiin myös SRK-menetelmän vertailukoe käyttäen samoja asfalttimassoja kuin vuoden 1993 tutkimuksessa. Tuloksia verrattiin vuoden 1993 tutkimuksen tapaan kahdeksan laitteen välillä. Vertailukokeessa menetelmän toistettavuudeksi saatiin 18 % ja uusittavuudeksi 20 % eli hajonnat olivat hieman suuremmat kuin edellisessä vertailukokeessa. (Laaksonen et al 2008)

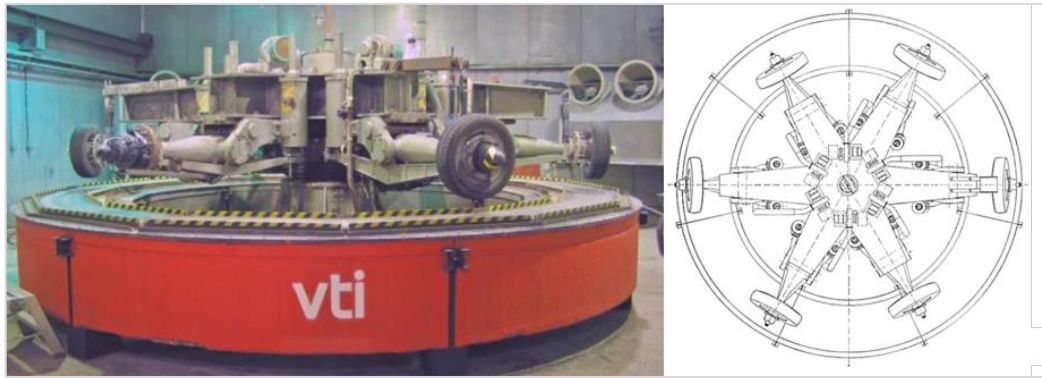
#### 4.1.2 Prall-menetelmä Ruotsissa

Prall-menetelmä on kehitetty Yhdysvalloissa asfalttipäällysteen tartunnan arviointiin. Tällöin menetelmässä käytetyt päällystettä kuluttavat kuulat olivat kumisia. (Viman 2011) Prall-menetelmää käytettiin tartuntakokeissa myös Itä-Saksassa ja SHELL:llä. 1970-luvun alkupuolella saksalaiset muunsivat Prall-laitetta nastarengaskulumisen arviointiin soveltuvaksi. Menetelmä esitettiin saksalaisissa ohjeissa ja se oli samankaltainen kuin nykyään: kammiossa liikkuvat teräskuulat kuluttivat asfalttinäytettä veden huuhtellessa hienoainesta pois. Laite on esitetty kuvassa 18. Laite on nimetty saksankielisen iskua ja ponnahdusta tarkoittavan Prall-sanan mukaan. Menetelmän kehitys loppui kuitenkin Saksassa nastarengaskiellon myötä. 1980-luvun lopussa ruotsalaiset Skanskan ja NCC:n edustajat tutustuivat Prall-laitteeseen Münchenin teknillisessä yliopistossa, ja vuonna 1992 Skanska hankki Tukholmaan Prall-laitteen käyttöönsä sitä massareseptien optimointeihin. (Jacobson & Viman 1996)



Kuva 18. Saksalainen Prall-laitteisto (muokattu lähteestä Jacobson & Viman 1996).

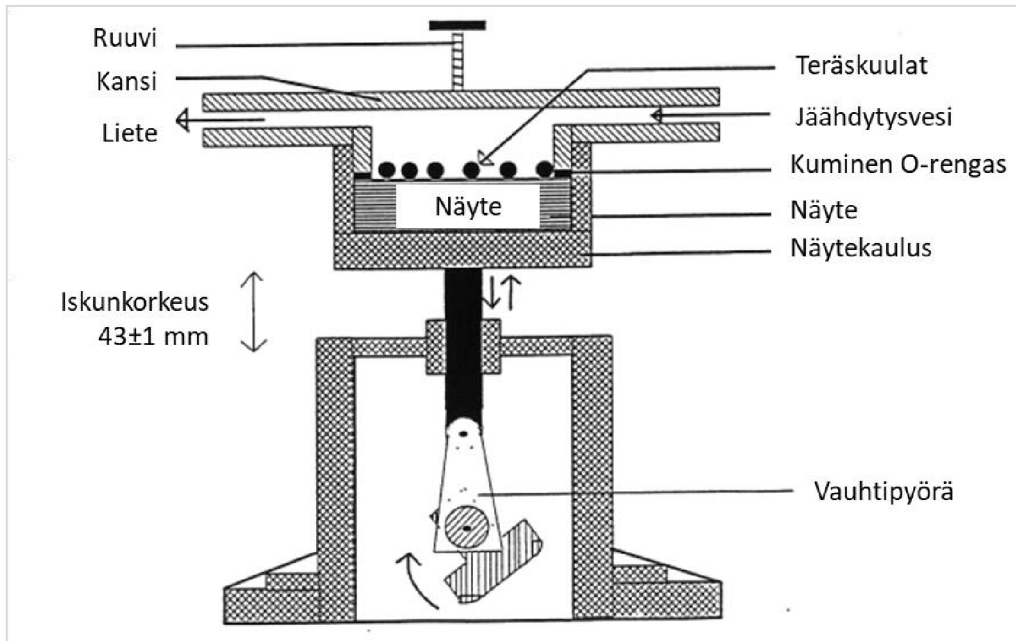
Vuonna 1992 Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI) tutki tiekuluman yhteyttä koetielaitteen tuloksiin (Jacobson 1992). VTI:lla on koetielaitte eli Provvägsmaskin (PVM), jossa neljä rengasta kiertää koetiellä 5,3 m halkaisijaltaan olevalla kehällä. Koetien materiaali ja renkaat voidaan vaihtaa tutkittavan kohteen mukaan, ja lisäksi laitteen nopeutta ja kokeen lämpötilaa voidaan säädellä. (Gustafsson & Eriksson 2015) Laite on rakennettu jo vuonna 1943, mutta sitä on paranneltu useaan kertaan (Jacobson 1994). Koetielaitte on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. VTI:n koetielaitte (muokattu lähteestä Lundberg et al 2019).

Vuoden 1992 tutkimuksessa havaittiin koetielaittekuluman ja tiekuluman välillä vahva korrelaatio korrelaatiokertoimen ollessa yli 0,95. Tutkimuksessa selvitettiin myös Tröger-laitteen tulosten yhteyttä tiekulumiin. Tröger-laitteen ja tiekuluman välillä ei havaittu olevan kovin vahvaa yhteyttä, sillä korrelaatiokertoimet vaihtelivat eri massoilla 0,51–0,99 välillä. Haasteita aiheutti myös se, että Tröger-menetelmässä ero hyvien ja huonojen materiaalien välillä on pieni, sillä neuojen vaikutus heikkenee kulumisen kasvaessa. VTI testautti myös AB 16 -näytteitä SRK-laitteella Suomessa VTT:llä. SRK-laitteella havaittiin olevan suhteellisen hyvä korrelaatio (0,87) kolmen talven tiekuluman kanssa. VTI koki kuitenkin SRK-menetelmän huonona puolena vähintään 50 mm korkuisen koekappaleen tarpeen useimpien testattavien päällysteiden ollessa 40 mm paksuisia. Tutkimusraportin mukaan VTI aikoi kehittää Tröger-menetelmää, mutta myös Prall- ja SRK-menetelmiä tulisi tutkia lisää. (Jacobson 1992)

Vuonna 1994 VTI tutki Ruotsissa koetielaitteen kulumien korrelaatiota tiekulumien kanssa. Tutkimuksessa tutkittiin myös eri tekijöiden, kuten kivilajin, kärkeän kiviaineksen määrän, maksimiraekoon ja tyhjätilan, vaikutusta kulumien suuruuteen. (Jacobson 1994) VTI testautti Skanskan Prall-laitteella koekappaleita, joiden koetielaitte- ja tiekulumien arvoja oli tutkittu aiemmin. Tulokset Prall-laitteen ja tiekulumien välisestä vertailusta olivat positiivisia, joten myös VTI hankki Prall-laitteita. Prall-laitteilla tehtiin testejä ja parametreja tarkennettiin testitulosten pohjalta. Vuoden 1994 loppupuolella VTI:n, Skanskan ja NCC:n edustajat loivat yhdessä Prall-menetelmästä ehdotuksen. Tämä kuvaus esitettiin myös ehdotuksena eurooppalaiseen standardiin. Vuonna 1994 Ruotsissa oli neljä Prall-laitetta. (Jacobson & Viman 1996) Kuvassa 20 on esitetty periaatekuva laitteesta.



Kuva 20. Prall-laitte Ruotsissa vuonna 1994 (muokattu lähteestä Jacobson & Viman 1996).

Vuonna 1994 VTI:n julkaisemassa tutkimusraportissa esitetään myös korrelaatiokertoimet eri menetelmien tulosten ja 2–3 talven tiekuluman välille asfalttimalloille AB 12–16 ja SMA 8–20. Esimerkiksi tiekuluman ja SRK-menetelmän väliseksi korrelaatiokertoimeksi on raportissa esitetty 0,88–0,97, tiekuluman ja Prall-menetelmän väliseksi 0,89–0,97 sekä tiekuluman ja Tröger-menetelmän väliseksi 0,68–0,99. (Jacobson 1994)

Vuosien 1994–1996 aikana VTI teki vertailukokeita, joissa kartoitettiin Prall-menetelmän tulokseen vaikuttavia tekijöitä. Vaikuttaviksi tekijöiksi havaittiin esimerkiksi veden lämpötila ja virtausnopeus. Lisäksi tutkittiin Prall-laitteen ja koetielaitteen tulosten yhteyttä. Tutkimuksissa Prall-laitteen ja koetielaitteen tulosten välillä havaittiin vahva korrelaatio SMA-näytteillä, mutta AB-näytteiden tuloksissa vaihtelua oli enemmän. Tutkimuksen perusteella Prall-menetelmällä havaittiin olevan hyvä toistettavuus ja näytteiden välisen hajonnan havaittiin olevan kohtuullinen, mutta esiin nousi tarve laboratorioden välisille vertailukokeille. Lisäksi tutkimuksessa todettiin, että laitteiden välisiä systemaattisia eroja voitaisiin vähentää yhtenäistämällä laitteita. (Jacobson & Viman 1996)

#### 4.1.3 Yhtenäinen standardi

Vuodelle 1996 suunniteltiin pohjoismaista kokousta nastarengaskulumista mittaaviin laboratoriomenetelmiin liittyen. Tarkoituksena kokouksessa oli keskustella Prall-menetelmästä saaduista kokemuksista ja menetelmän kehittämisestä. Tätä ennen myös SRK-menetelmä oli toimitettu ehdotuksena eurooppalaiseen standardiin (Jacobson & Viman 1996) ja myös Suomessa oli testattu Prall-laitetta. Suomen ensimmäinen Prall-laitte oli TKK:lla 1990-luvun puolivälissä (Laitinen 2020). Suomalaiset ehdottivat kokemusten pohjalta Prall-menetelmään muun muassa veden lämpötilan madaltamista, suurempaa veden virtausnopeutta sekä matalampaa kierrosnopeutta. Suunnitteilla oli myös Prall- ja

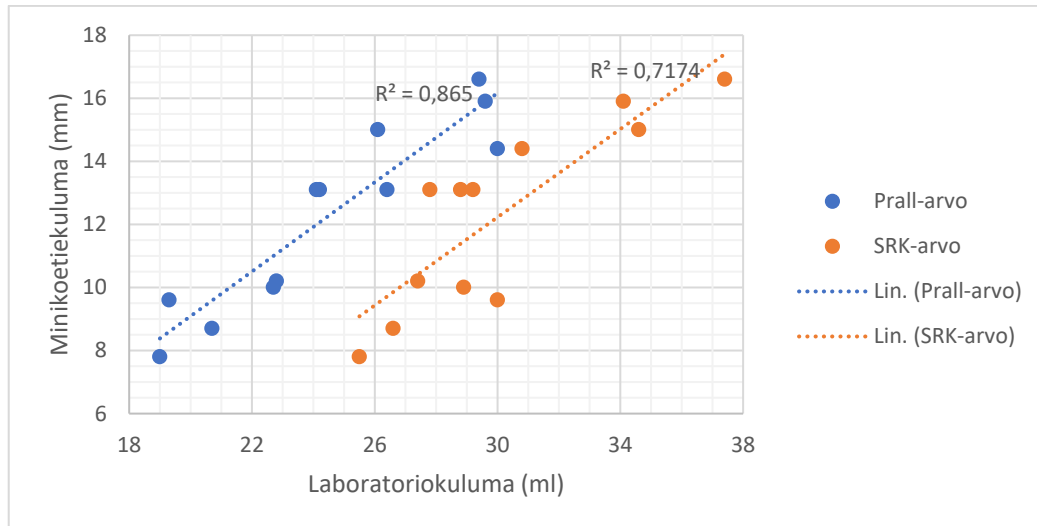
SRK-menetelmien välinen vertailukoe. Ruotsissa SRK-menetelmä koettiin kuitenkin kalliiksi, laitteen renkaiden vaihto työlääksi ja koekappaleiden paksuusvaatimus liian suureksi. (Jacobson & Viman 1996)

Vuonna 1997 Suomessa TKK ja VTT vertailivat AB- ja SMA -näytteiden laboratorioroiden välisiä Prall-tuloksia ja eri parametrien vaikutusta tulokseen. Tutkittavia parametreja olivat kierrosnopeus ja vesimäärä. (Laaksonen et al 2008) Ruotsissa vuonna 1998 VTI:n teettämässä tutkimuksessa vertailtiin kuuden laboratorion välillä Prall-tuloksia. Mukana oli kaksi suomalaista ja neljä ruotsalaista laboratoriota. Tutkittavia massoja olivat SMA 16 ja AB 16, ja menetelmän toistettavuuden havaittiin olevan parempi SMA-näytteillä kuin AB-näytteillä. Keskimäärin menetelmän toistettavuus oli 15 % ja uusittavuus 20 %. Laitteiden välillä havaittiin systemaattisia eroja muun muassa iskunpituudessa ja lattiavaimennuksessa. Tutkimuksessa selvitettiin myös Prall-menetelmän ja koetielaitteen korrelaatiota. Tutkimuksen pohjalta luotiin taulukossa 13 esitetyt luokat Prall-arvoille. (Jacobson & Viman 1998)

*Taulukko 13. Ensimmäiset Prall-luokat (muokattu lähteestä Jacobson & Viman 1998).*

Luokka	Prall-arvo (ml)	Kulumiskestävyys
1	< 20	Todella hyvä
2	20-29	Hyvä
3	30-39	Tyydyttävä
4	40-50	Välttävä
5	> 50	Huono

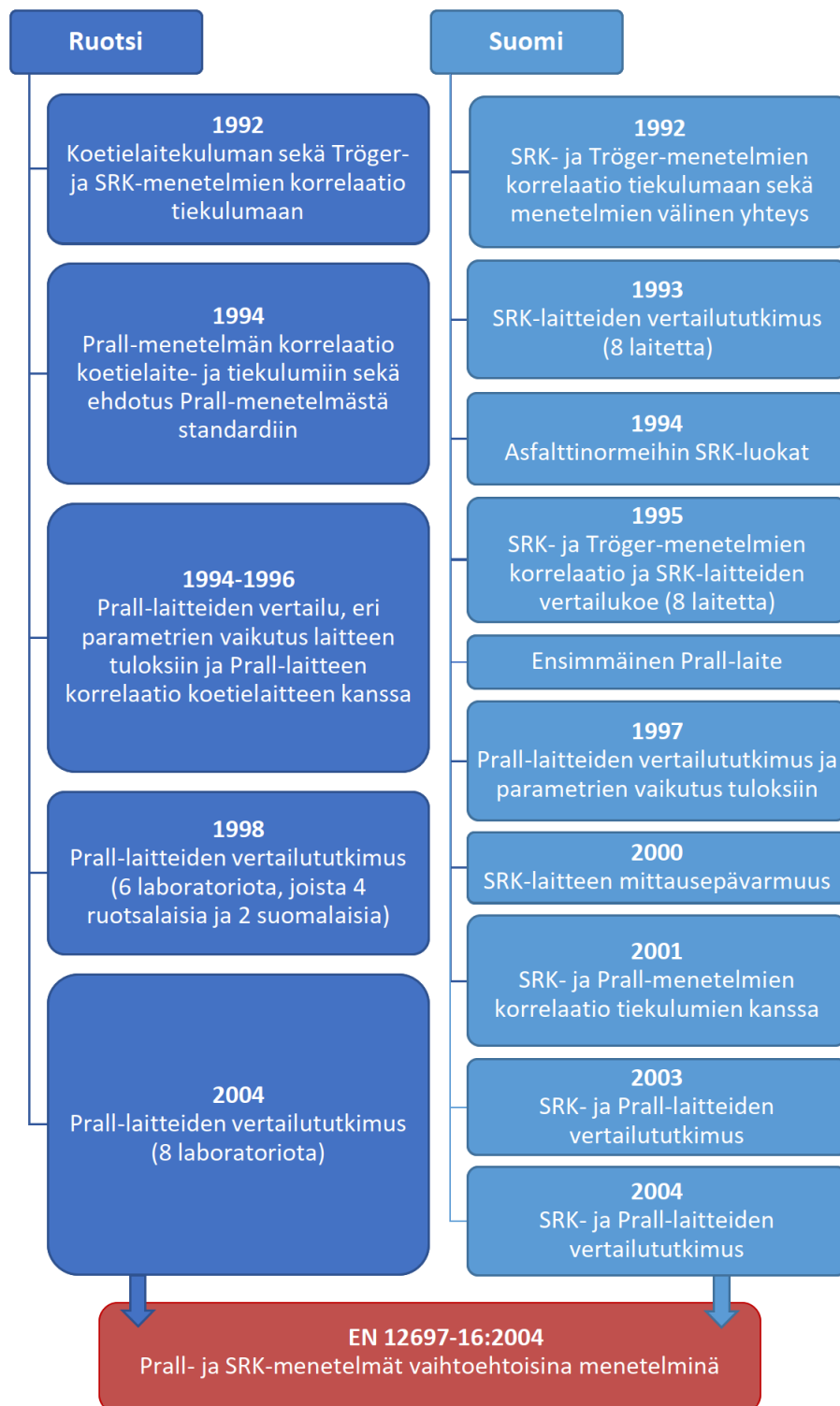
Tämän jälkeen Suomessa SRK-menetelmässä havaittiin olevan heikkouksia. SRK-arvo ei kuvannut tarkkaan kulumista kaikilla kiviaineksilla, kun taas kiviaineksen kuulamylyarvon ja pistekuormitusindeksin havaittiin kuvaavan hyvin päällysteen kulumisominaisuuksia (Kurki 1998). 1990-luvun lopussa Suomessa havaittiin SRK-laitteen tulostason muuttuvan laitteen ikääntyessä (Laitinen 2020). Suomessa tutkittiinkin vuonna 2000 SRK-laitteen mittausepävarmuutta VTT:n tutkimuksessa (Laaksonen et al 2008). Vuonna 2001 tutkittiin Prall- ja SRK-menetelmien välistä yhteyttä minikoetiekulumien avulla ja tutkimuksessa luotiin menetelmien välille kaava. Tutkimuksessa todettiin Prall-laitteella olevan SRK-laitetta vahvempi korrelaatio minikoetiekulumien kanssa, ja lisäksi Prall-laitteen havaittiin huomioivan kiviaineksen raemuodon vaikutus päällysteen kulumiskestävyys SRK-laitetta paremmin. Tutkimuksessa havaitut korrelaatiot on esitetty kuvassa 21. Tutkimuksessa Prall-laitteen eduksi koettiin myös se, että koekappaletta kulutetaan todellisen nastarengaskulutuksen suunnasta toisin kuin SRK-menetelmässä. (Alkio 2001) Samaan aikaan SRK-laitteet alkoivat korvautumaan Prall-laitteilla ja SRK-laitteen käyttö siten väheneään (Laitinen 2020).



Kuva 21. Prall- ja SRK-arvo suhteessa minikoetiekulumaan SMA 18- ja SMA 20 -päällysteillä (muokattu lähteestä Alkio 2001).

Vuosina 2003–2004 Pohjoismaissa tutkittiin molempia menetelmiä ja tehtiin vertailukokeita. Vuonna 2003 Suomessa tehtiin SRK- ja Prall-laitteiden vertailututkimus, ja samalla tutkittiin myös uudenlaisen nastan vaikutusta SRK-kokeen tuloksiin (PANK ry 2003). HILJA-projektissa taas havaittiin, ettei Prall-menetelmä korreloi tiekuluman kanssa hiljaisilla päällysteillä (Kelkka et al 2003). Vuonna 2004 vertailtiin Suomessa SRK- ja Prall-menetelmiä. VTT:n tutkimuksessa selvitettiin menetelmien korrelaatiota urautumisen kanssa sekä eri muotoisten kivien ja eri sideaineiden vaikutusta saataviin tuloksiin. Molempien menetelmien havaittiin korreloivan tiekuluman kanssa hyvin ja SRK-kulumien olevan noin 25–30 % suurempia kuin Prall-kulumien. Prall-menetelmän todettiin ottavan paremmin huomioon kiviaineksen muodon ja sideaineen kovuuden. Tutkimuksessa todettiin myös, että Prall-menetelmä ei sovellu asfalttimassoille, joissa on kumibitumia. (Laaksonen et al 2008) Vuonna 2004 Ruotsissa NCC vertaili SMA 11- ja AB 11 -näytteiden Prall-arvoja kahdeksan eri laboratorion välillä. Prall-arvot vaihtelivat SMA-näytteillä noin välillä 16–22 ml ja AB-näytteillä noin välillä 35–43 ml. (Viman 2011)

Vuonna 2004 julkaistiin standardi EN 12697-16, jossa esitettiin asfalttimassojen testausmenetelmät nastarengaskulumisen osalta. Standardissa esitettiin sekä suomalainen että ruotsalainen menetelmä: menetelmänä A oli Prall-menetelmä ja menetelmänä B SRK-menetelmä. Menetelmillä tutkittavien asfalttimassojen maksimiraekooksi määritettiin 22 mm. Vuoden 2004 standardiin menetelmien käyttötarkoituksia ei eritelty. Standardiin saatiin Prall-menetelmän tarkkuusarvot ruotsalaisesta vuoden 1998 vertailututkimuksesta ja SRK-menetelmän arvot vuoden 1995 suomalaisesta tutkimuksesta. (SFS-EN 12697-16 2004) Kuvaan 22 on koottu ennen standardin julkaisua tehdyt Prall- ja SRK-menetelmiä koskevat tutkimukset Ruotsista ja Suomesta.



Kuva 22. Prall- ja SRK-menetelmiä koskevat tutkimukset vuoteen 2004 mennessä.

Vuonna 2004 julkaistun standardin jälkeen Suomessa kuitenkin yleistyi Prall-menetelmän käyttö ja SRK-menetelmä jäi toissijaiseksi menetelmäksi. Tähän vaikutti kaksi keskeistä tekijää: asfalttimassan tyyppitestaus CE-merkintää varten aloitettiin sekä SRK-laitteissa havaittiin hajonnan kasvua kulumisen myötä.

Vuonna 2004 PANK ry:n Asfalttinormitoimikunnan kokouksessa käsiteltiin CEN-kokouksen sisältöä. CEN-kokouksen mukaan asfalttimassan tyyppitestauksessa yksi massan ominaisuus voidaan määrittää vain yhdellä menetelmällä, ja tämä liittyi siis muun muassa päällysteen nastarengaskulumista mittaaviin menetelmiin. Mikäli kuitenkin kahdella menetelmällä olisi riittävä korrelaatio, voitaisiin CEN-kokouksen mukaan hyväksyä yksi menetelmä referenssimenetelmäksi ja toinen rinnakkaismenetelmäksi. (PANK ry 2004a) Tämän jälkeen PANK ry:n laboratoriotuimikunta vastasi tyyppitestausmenetelmiin liittyvään CEN-kyseleyn ja esitti Suomen osalta nastarengaskulumista mittaavaksi referenssimenetelmäksi Prall-menetelmää ja rinnakkaismenetelmäksi SRK-menetelmää (PANK ry 2004b). Tämän mukaisesti lähetettiin myös ehdotus komissioon (PANK ry 2004c). Vuonna 2005 PANK ry toteutti SRK- ja Prall-menetelmien vertailukokeen (PANK ry 2005). Vuonna 2006 asfalttimassan tyyppitestauksesta julkaistiin standardi, jonka mukaan päällysteen nastarengaskulumiskestävyys tulee määrittää standardin EN 12697-16 mukaisesti menetelmällä A eli Prall-menetelmällä (SFS-EN 13108-20 2006).

Samaan aikaan Asfalttinormeissa oli kuitenkin esitetty edelleen vain SRK-menetelmä, sillä voimassa oli vuoden 2000 Asfalttinormit päivitettyinä vuonna 2003 julkaistulla lisälehdellä. Asfalttinormitoimikunnan kokouksessa vuonna 2004 keskusteltiin Asfalttinormien muutostarpeista ja Prall-menetelmän lisäämisestä SRK-menetelmän rinnalle vaihtoehtoiseksi menetelmäksi (PANK ry 2004c). Menetelmiä pidettiin vaihtoehtoisina vielä vuoden 2007 tammikuun Asfalttinormitoimikunnan kokouksessa. Tällöin oli kuitenkin havaittu, ettei Prall-menetelmä sovellu polymeerimodifioidulle sideaineelle. (PANK ry 2007a) Huhtikuussa 2007 Asfalttinormitoimikunnan kokouksessa aiottiin jättää SRK-menetelmä kokonaan pois vuoden 2008 Asfalttinormeista, sillä vertailukokeessa oli havaittu todella suuri hajonta eri laitteiden välillä (PANK ry 2007b). Esimerkiksi vuonna 2006 VTT:n tutkimuksessa SRK-menetelmän toistettavuudeksi saatiin noin 7–13 %, mutta uusittavuus oli kasvanut arvoon 47 % (Laaksonen et al 2008).

PANK ry:n Laboratoriotuimikunta kannatti kuitenkin SRK-menetelmän säilyttämistä Asfalttinormeissa, joten Asfalttinormitoimikunnan kokouksessa todettiin Prall-menetelmän olevan ensisijainen menetelmä, mutta modifioiduilla sideaineilla käytettävän SRK-menetelmää (PANK ry 2007c). SRK-menetelmä säilytettiin siis Asfalttinormeissa, sillä Prall-menetelmä ei soveltunut polymeerimodifioituille massoille (Laitinen 2020). Prall-menetelmä lisättiin vuoden 2008 Asfalttinormeihin ja SRK-menetelmän tarkennettiin soveltuvan vain asfalttimassoille, joissa on modifioitua bitumia (Asfalttinormit 2008). Similän (2018) mukaan vuonna 2018 Suomessa oli kaksi toimintakunnossa olevaa SRK-laitetta. Muissa maissa SRK-laitteita ei luultavasti ole ollut ollenkaan (Laitinen 2020).

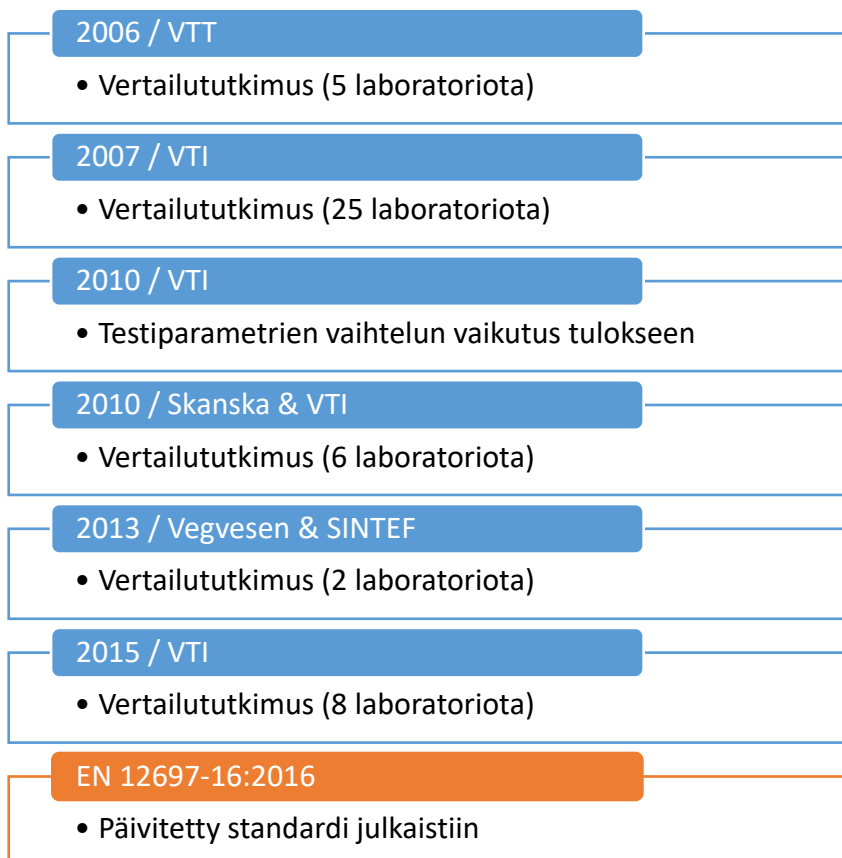
## 4.2 Prall-menetelmän toistettavuus ja uusittavuus

Päällysteen kulumiskestävyyttä testaavien menetelmien haasteena on laitteiden kulumisen ja siten myös testitulosten muuttuminen ajan kuluessa. Tämä voi heikentää saman laitteen tulosten toistettavuutta tai eri laitteiden välistä tulosten uusittavuutta. Prall-menetelmällä saatetaan myös mitata enemmän asfalttimassan tarttuvuutta kuin päällysteen kulumiskestävyyttä kivien irrotaessa



näytteestä tai koekappaleen reunan murtuessa. (Viman 2011) Prall-menetelmässä näytekappaleen testattava pinta-ala on vain noin 58 cm<sup>2</sup>, minkä vuoksi yksittäisen kivirakeen tai lajittuman vaikutus Prall-arvoon on suuri (Laaksonen et al 2008). Lisäksi asfalttipäällyste on aina epähomogeenista, mikä aiheuttaa hajontaa tuloksiin. Näistä syistä Prall-menetelmän toistettavuus ja uusittavuus ovatkin aiheuttaneet haasteita. Esimerkiksi Lemminkäinen Oy:n julkaisemassa Asfalttirakenteiden suunnittelun käsikirjassa (2017) ei suositeltu Prall- tai SRK-menetelmien käyttöä päällysteen kulumiskestävyyden määrittämisessä, vaan suositeltiin ennemmin kulutuskestävyysvaatimuksen asettamista kiviainekselle.

Prall-menetelmän toistettavuutta ja uusittavuutta on selvitetty ja pyritty parantamaan vertailemalla laboratorioden tuloksia. Vertailukokeissakin haasteena on ollut selvittää, onko ero laitteissa vai menetelmässä, kuten kierrosnopeudessa, iskussa tai kuulissa (Viman 2011). Tavoitteena Prall-laitteen kehitystyössä on ollut pitää laite mahdollisimman yksinkertaisena, jotta mahdollisimman monet laboratoriot voisivat hankkia niitä. Laboratoriotestauksessa kuitenkin useat parametrit voivat vaikuttaa tulokseen. Laitteita onkin pitänyt jonkin verran monimutkaistaa lisälaitteilla, jotta voidaan hallita kokeen olosuhteita, kuten veden virtausta ja lämpötilaa. (Jacobson & Viman 1996) Pohjoismaissa on tehty lukuisia vertailukokeita Prall-menetelmän toistettavuuteen ja uusittavuuteen liittyen ja menetelmää on kehitetty näiden pohjalta. Tutkimukset vuosilta 2006–2016 on koottu kuvaan 23.



Kuva 23. Prall-menetelmää koskevat vertailututkimukset vuosina 2006–2016.

Vuonna 2006 Suomessa VTT:n tutkimuksessa tutkittiin Prall-menetelmän toistettavuutta ja uusittavuutta. Mukana oli viisi laboratoriota, ja tutkittavia massoja olivat SMA 20, SMA 16 ja AB 16. Prall-menetelmän toistettavuudeksi saatiin SMA 16- ja AB 16- näytteillä noin 19 % ja uusittavuudeksi noin 21 %. SMA 20 -näytteillä hajonta oli pienempi: toistettavuudeksi saatiin 6 % ja uusittavuudeksi 9 %. (Laaksonen et al 2008)

Vuonna 2007 VTI:n tutkimuksessa vertailtiin 25 laboratorion välillä tieltä porattujen näytteiden Prall-arvoja. Mukana oli 20 ruotsalaista ja 5 suomalaista laboratoriota, ja tutkittavana massana oli SMA 16. Toistettavuudeksi saatiin ruotsalaisilla laboratorioilla noin 35 % ja uusittavuudeksi 43 %. Suomalaisilla laboratorioilla taas toistettavuus oli noin 34 % ja uusittavuus 60 %, ja yhden laboratorion tulos poikkesi selvästi muista. Tämän jälkeen laboratorioden välillä menetelmää yhtenäistettiin, muun muassa määritettiin kuulasarjalle kokonaismassa sekä tiukempi toleranssi iskunpituudelle ja kierrosnopeudelle. Muutosten jälkeen Prall-arvot mitattiin uudelleen, jolloin ruotsalaisilla laboratorioilla toistettavuus oli parantunut arvoon 30 % ja uusittavuus arvoon 39 %. Vastaavasti suomalaisilla laboratorioilla toistettavuus parani arvoon 24 % ja uusittavuus arvoon 47 %. Tutkimuksessa suomalaisten laboratorioden Prall-tulosten havaittiin olevan keskimäärin pienempiä kuin ruotsalaisten laboratorioden. Suuret toistettavuus- ja uusittavuusarvot selittyivät osin sillä, että näytteet oli porattu tieltä, joten myös näytteiden välillä oli vaihtelua. Tutkimuksessa selvitettiin myös AB 16 -näytteiden Prall-arvojen vaihtelua 8 laboratorion välillä vastaavalla tavalla, ja tällä massalla Prall-arvojen toistettavuus ja uusittavuus heikkenivät menetelmätarkennusten jälkeen. Tutkimuksessa havaittiin Prall-arvon määrittämisessä ongelmia veden virtauksen pysähtyessä, jolloin näyte lämpeni, bitumi pehmeni ja saatu Prall-arvo oli liian pieni. Ongelmia havaittiin myös kivien irrotaessa näytteestä, jolloin määritetty arvo oli liian suuri. (Viman & Hakim 2010)

Vuonna 2010 Ruotsissa VTI:n tekemässä tutkimuksessa selvitettiin eri parametrien vaikutusta Prall-arvoon. Testissä tutkittiin maksimiraekooltaan 4 ja 8 mm asfalttimassoja. Tutkittavia parametreja olivat iskunpituus, veden lämpötila, kuulien mitat ja massat, kierrosnopeus, testiaika sekä näiden yhteisvaikutus. Lähtökohtana oli vuoden 2004 standardissa määritetyt toleranssit. Vimanin mukaan toleranssien ääripäiden yhteisvaikutuksella oli mahdollista vaikuttaa Prall-arvoon 8 yksiköllä eli 25 prosentilla. Nämä havainnot on esitetty taulukossa 14. Mikäli oletetaan, että laboratorio ei ole eri parametreilla toleranssirajojen ääripäissä, oli Vimanin arvio parametrien vaikutuksesta noin 4 yksikköä eli 15 % Prall-arvossa. (Viman 2011)

*Taulukko 14. Vimanin (2011) tutkitut parametrit, niiden vaihteluvälit ja vaikutus Prall-arvoon vaihteluvälillä.*

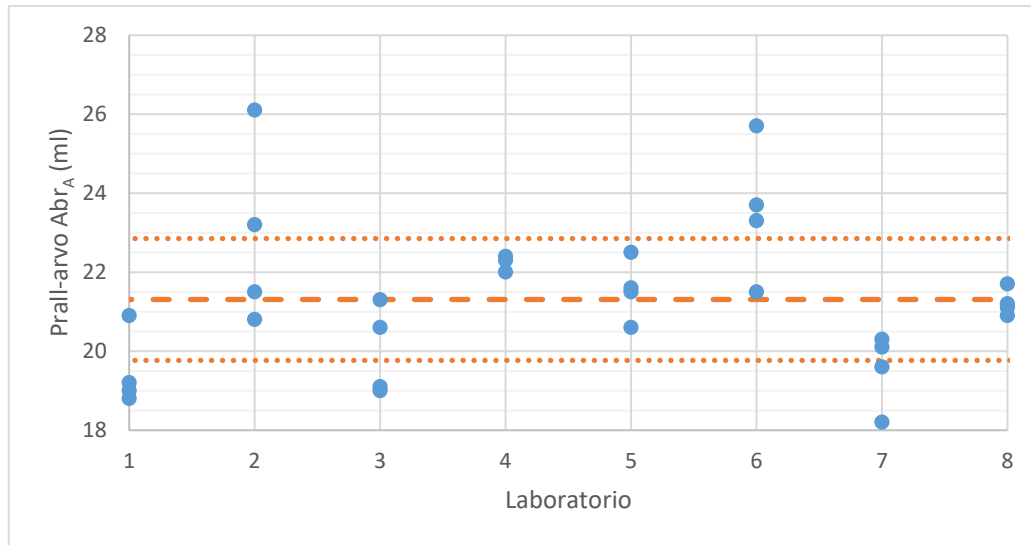
Parametri	Vaihteluväli	Vaikutus Prall-arvoon
Iskunpituus	43±1 mm	4 %
Veden lämpötila	5±1 °C	6 %
Kuulien halkaisija	11,5–12,1 mm	5 %
Kuulasarjan massa	248–288 g	5 %
Kierrosnopeus	950 ± 10 kierrosta /min	8 %
Yhteensä		~25 %

Tutkimuksen lopputuloksena esitettiin kehitysehdotuksia menetelmään: muun muassa kumirenkaan paksuusvaatimuksen määrittäminen, kuulien kovuusvaatimuksen muuttaminen ja vähimmäismassan määrittäminen, kierrosnopeuden ja testiajan toleranssin kiristys, testin aikana irronneiden kiviä systemaattinen käsittely sekä testaaminen näytteiden sahatuilta pinnoilta. (Viman 2011)

Vuonna 2010 Skanska ja VTI tekivät Ruotsissa vertailututkimuksen, jossa tutkittiin kuuden laboratorion välillä Prall-arvojen hajontaa. Tutkittavia massoja olivat SMA 16, SMA 11, AB 16 ja AB 4. Tutkimuksessa havaittiin hajonnan olevan suurin SMA 16 -näytteillä ja pienin AB-näytteillä sekä yhden laitteen antavan selvästi matalampia tuloksia muiden laitteiden tuloksiin verrattuna. Kun tämä laboratorio poistettiin tarkastelusta, SMA 16 -näytteiden tulokset laboratorion välillä vaihtelivat välillä 15–21 ml ja AB 16 -näytteiden välillä 29–34 ml. Tutkimuksen pohjalta esitettiin kehitysehdotuksia laitteisiin ja pohdittiin referenssimateriaalin kehittämistä. Tutkimuksessa testattiin referenssimateriaaliksi AB 4 -näytettä, kiveä ja betonia, mutta parhaaksi vaihtoehdoksi todettiin SMA 16 -näyte hyvin tunnetulla kiviaineksella. Tiheyden mukaan jaotelluilla SMA 16 -näytteillä tehtiin toinen vertailukoe kuuden laboratorion välillä, ja tällöin laboratorion määrittämät Prall-keskiarvot olivat välillä 24,7–27,1 ml. (Gorski 2010)

Vuonna 2013 Norjassa vertailtiin kahdessa laboratoriossa tieltä otettujen SMA- ja AB-näytteiden Prall-arvoja. SMA-näytteiden tuloksissa havaittiin pienempi hajonta kuin AB-näytteillä. Tutkimuksessa havaittiin yhteys näytteen Prall-arvon ja massatyyppin välillä. Sen sijaan eri laboratorion saamien tulosten välillä ei havaittu yhteyttä. (Rise & Brcic 2013)

Vuonna 2015 tehtiin pohjoismaalainen NordFoU-vertailututkimus, jossa mukana olivat Ruotsi, Suomi, Norja ja Islanti. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, miten Prall-menetelmää tulisi kehittää ja tuloksia arvioida. Ensimmäisessä vaiheessa tehtiin laboratorion välinen vertailukoe kahdessa osassa. Tutkittavia massoja olivat SMA 16 ja AB 11. Neljässä eri maassa olevien kahdeksan laboratorion välillä menetelmän toistettavuudeksi saatiin 20 % ja uusittavuudeksi 26 %. Toistettavuuden parantamiseksi näytteitä testattiin myös standardista poikkeavalla kierrosnopeus-testiaikayhdistelmällä, mutta tämän ei kuitenkaan havaittu parantavan toistettavuutta. Eri laboratorion Prall-laitteiden välillä havaittiin eroja muun muassa männän iskunpituudessa, kumirenkaassa sekä kuulien kovuudessa, materiaalissa ja massassa. Laboratorion kuulat ja kumirenkaat yhtenäistettiin, ja tämän jälkeen toistettavuus ja uusittavuus tutkittiin uudelleen SMA 11- ja AB 11 -näytteillä. Tuloksen toistettavuus parani arvoon 15 %, mutta uusittavuus heikkeni arvoon 28 %. (NordFoU 2015) SMA 11 -näytteiden yksittäistulokset laboratorioittain yhtenäistämisen jälkeen on esitetty kuvassa 24.



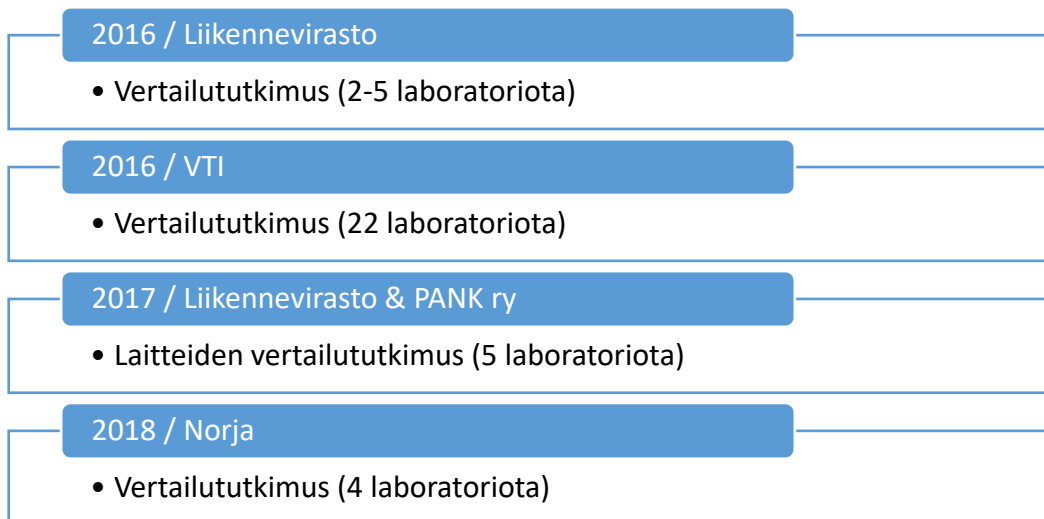
Kuva 24. NordFoU-tutkimuksen SMA 11-näytteiden yksittäistulokset sekä laboratorioiden välinen keskiarvo ja keskihajonta (muokattu lähteestä NordFoU 2015).

NordFoU-tutkimuksen toisessa vaiheessa vertailtiin laboratoriossa valmistettujen ja tieltä porattujen näytteiden tulosten eroja. Molemmat näytteet valmistettiin laboratoriossa, mutta laboratorionäytteet olivat Marshall-tiivistettyjä ja testattiin sahatulta pinnalta, kun taas tienäytteet porattiin asfalttilaatasta ja testattiin sahaamattomalta pinnalta. (NordFoU 2015) Marshall-näytteet valmistetaan standardin SFS-EN 12697-30 (2019) mukaan tiivistämällä iskuvasaralla asfalttimassasta muottiin näyte, jonka halkaisija on 101,6 mm ja korkeus 63,5 mm. NordFoU-tutkimuksessa SMA-näytteille saatiin molemmilla tavoilla samankaltaiset Prall-tulokset. AB-näytteillä sen sijaan tulokset poikkesivat ja syyksi esitettiin näytteen pinnalta kuluva mastiksia. Tutkimuksessa testattiin myös veden lämpötilan vaikutusta: lämpötilan huomattiin aiheuttavan AB-näytteiden tuloksiin eroa, kun taas SMA-näytteiden tuloksissa eroa ei havaittu. (NordFoU 2015)

Edellä esitettyjen tutkimusten pohjalta julkaistiin päivitetty EN 12697-16 -standardi vuonna 2016. Standardiin päivitettiin NordFoU-tutkimuksen tarkkuusarvot eli Prall-arvon toistettavuudeksi määritettiin 15 % ja uusittavuudeksi 27 %. Standardiin täsmennettiin Prall-laitteiston mittoja sekä pienennettiin esimerkiksi veden virtausnopeuden, kierrosajan ja testiajan toleransseja. Standardiin myös lisättiin kirjaukset, miten toimitaan veden virtauksen pysähtyessä ja kivien irrotaessa. Menetelmän A (Prall-menetelmän) tarkennettiin soveltuvan tiebitumisille massoille. Lisäksi tarkennettiin, että menetelmä A ei sovellu polymeereillä tai kumilla modifioituille bitumeille. Menetelmän B (SRK-menetelmän) taas esitettiin soveltuvan käytettäväksi polymeerimodifioituilla bitumeilla. (SFS EN 12697-16 2016)

### 4.3 Prall-menetelmän nykytilanne

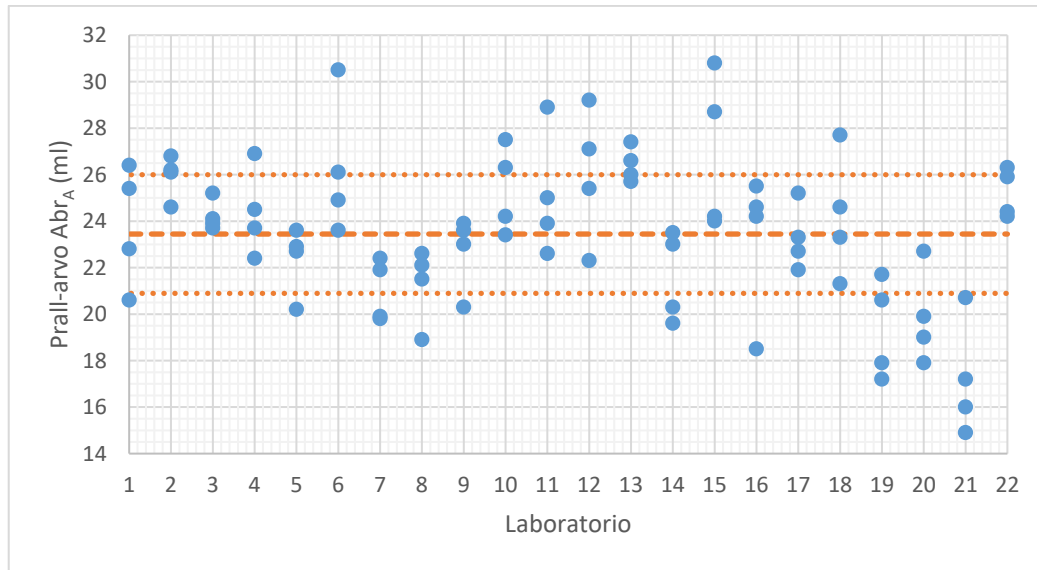
Vuoden 2016 standardipäivityksen jälkeen on tehty lisää vertailututkimuksia Prall-laitteilla ja pyritty selvittämään menetelmän toistettavuuden ja uusittavuuden nykytila. Tutkimukset vuosilta 2016–2018 on koottu kuvaan 25.



Kuva 25. Prall-menetelmää koskevat vertailututkimukset vuosina 2016–2018.

Suomessa vuosina 2016–2017 tehtiin Prall-menetelmän vertailututkimuksia. Liikenneviraston vuonna 2016 teettämässä tutkimuksessa vertailtiin kahden eri laboratorion välillä AB 16- ja SMA 16 -näytteiden sahatuilla ja sahaamattomilta pinnoilta määritettyjä Prall-arvoja. Laboratorioiden välillä AB-näytteiden tulosten eron havaittiin olevan suurempi kuin SMA-näytteillä ja sahatuilla pinnoilta määritettyjen arvojen eron hieman pienempi kuin sahaamattomilta pinnoilta määritettyjen. Lisäksi tutkittiin Prall-tuloksia viiden laboratorion välillä 6 mm kivellä päällystetyllä betonilaatalla, jolloin tulokset olivat noin välillä 40–55 ml. Yhden laboratorion tulos oli kuitenkin huomattavan suuri, kun taas muiden laboratorioiden tulokset olivat noin välillä 40–46 ml keskiarvon ollessa 43,3 ml. Vuonna 2017 Liikennevirasto ja PANK ry tilasivat opinnäytetyön, jossa arvioitiin Suomen viiden Prall-laitteen eroavaisuuksia. Tutkimuksessa eroja havaittiin pehmikekumin paksuudessa ja vaihtotavassa, liukulaakerin kuluneisuudessa, kiertokangen laakerin kiinnityksessä ja teräskuulien vaihtotavassa. Yhdessäkään laboratoriossa ei ollut virtausmittaria, vaan virtaamaa seurattiin laskeamalla vettä astiaan ja kellottamalla aikaa. Kehitysehdotuksena tuotiinkin esiin virtaamamittarin liittäminen laitteeseen. (Bäckström 2017)

Vuonna 2016 tehtiin pohjoismainen vertailututkimus, jossa arvioitiin Prall-menetelmän toistettavuutta ja uusittavuutta standardiin tehtyjen muutosten jälkeen. Mukana tutkimuksessa oli 22 laboratoriota neljästä eri maasta. Tutkittavia massoja olivat SMA 11, SMA 16 ja AB 16, joista kustakin testattiin 4 rinnakkaisnäytettä. Tutkimuksessa menetelmän toistettavuudeksi saatiin 18 % ja uusittavuudeksi 33 %, eli vaihtelu oli kasvanut standardipäivitystä ennen tehdyn NordFoU-tutkimuksen arvoista. Toisaalta tulokset olivat hieman paremmat tarkasteltaessa vain myös NordFoU-tutkimuksessa mukana olleiden laboratorioiden tuloksia: näillä laboratorioilla toistettavuus oli 17 % ja uusittavuus 23 %. Tutkimuksessa havaittiin yhteys yksittäisen laitteen ja Prall-tulostason välillä: mikäli laboratorio sai yhdellä näytteellä suhteessa matalan arvon, sai se matalan tuloksen myös muilla näytteillä. (Waldemarson & Viman 2017) Tutkimuksen SMA 16 -näytteiden yksittäistulokset laboratorioittain sekä laboratorioiden välinen keskiarvo ja keskihajonta on esitetty kuvassa 26.



Kuva 26. Laboratorioiden SMA 16-näytteiden yksittäistulokset sekä laboratorioiden välinen keskiarvo ja keskihajonta (muokattu lähteestä Waldemarson & Viman 2017).

Norjassa tehtiin vuonna 2018 Prall-menetelmän vertailututkimus neljän laboratorion välillä. Tutkittavana massana oli AGB 11 amiinitartukkeella ja ilman tartuketta. Eri laboratorioiden saamat tulokset vaihtelivat lähes 19 yksikköä tartuketta sisältävillä näytteillä ja noin 14 yksikköä näytteillä ilman tartuketta. Laboratorion sisällä saman massan yksittäistulokset vaihtelivat suurimmillaan lähes 8 yksikköä. (Hoseth 2019)

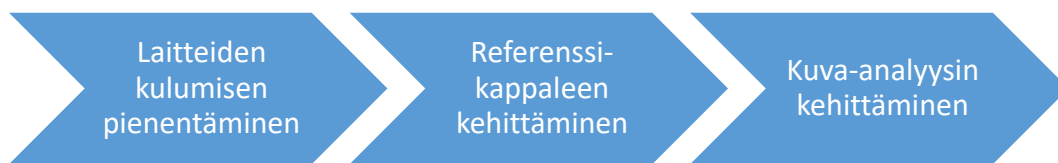
Edellä esitettyjen tutkimusten perusteella voidaan todeta, että vuoden 2016 standardipäivityksen jälkeen Prall-menetelmän toistettavuudessa ja uusittavuudessa on edelleen haasteita. Toisaalta Prall-arvoille on esitetty tiukat vaatimukset esimerkiksi Suomen vuoden 2019 tienpäälystysurakoiden yleisissä arvonmuutosperusteissa. Niissä on tieltä otettujen Prall-näytteiden keskiarvolle määritetty taulukon 15 mukaiset arvonmuutosprosentit. Taulukkoon on myös laskettu esimerkkinä arvonmuutosrajat Prall-vaatimuksen ollessa luokka I, jolloin Prall-arvo saa olla korkeintaan 22.

Taulukko 15. Arvonmuutokset Prall-tulosten perusteella luokassa I (muokattu kohteesta ELY-keskus 2018).

Ylitys	Toimenpide	Ylitystä vastaava Prall-arvo luokassa I
1–2 %	Päälysteestä maksetaan 90 %	22,2–22,5 ml
3–6 %	Päälysteestä maksetaan 80 %	22,6–23,4 ml
> 6 %	Päälysteestä maksetaan 70 %	23,5–30 ml
Luokka yhden luokan vaadittua heikompi	Päälyste hylätään	> 30 ml

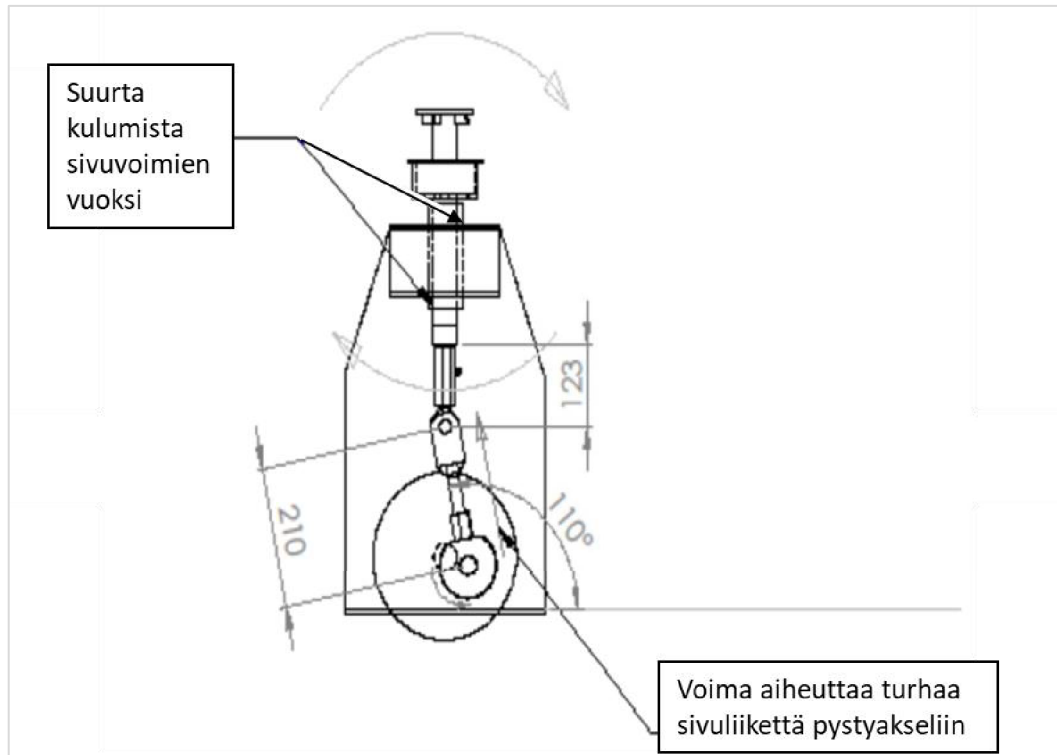
Taulukosta 15 ilmenee, että luokassa I Prall-arvojen keskiarvon ollessa vain 0,2 yksikköä luokkarajaa heikompi, maksetaan päällysteestä enää 90 %. Keskiarvon ollessa 0,6 yksikköä luokkarajaa heikompi, maksetaan päällysteestä 80 %, ja mikäli keskiarvo on 1,5 yksikköä heikompi, maksetaan päällysteestä 70 %. Jos keskiarvo on yli 8 yksikköä luokkarajaa heikompi, koko päällyste hylätään. Toisaalta esimerkiksi Hietalan ja Kuulan (2019) tutkimuksessa testattiin yhdessä suomalaisessa laboratoriossa kahdesta eri kiviaineksesta AB 16 -massasta valmistetut viisi Prall-rinnakkaisnäytettä. Tulosten keskiarvon perusteella molemmat massat kuuluivat luokkaan  $Abr_{Amax}28$ , mutta yksittäistulokset vaihtelivat näytteillä noin 9–10 yksikköä. (Hietala & Kuula 2019)

Prall-menetelmän kehittämiseksi esitetyt keskeiset ehdotukset on koottu kuvaan 27.

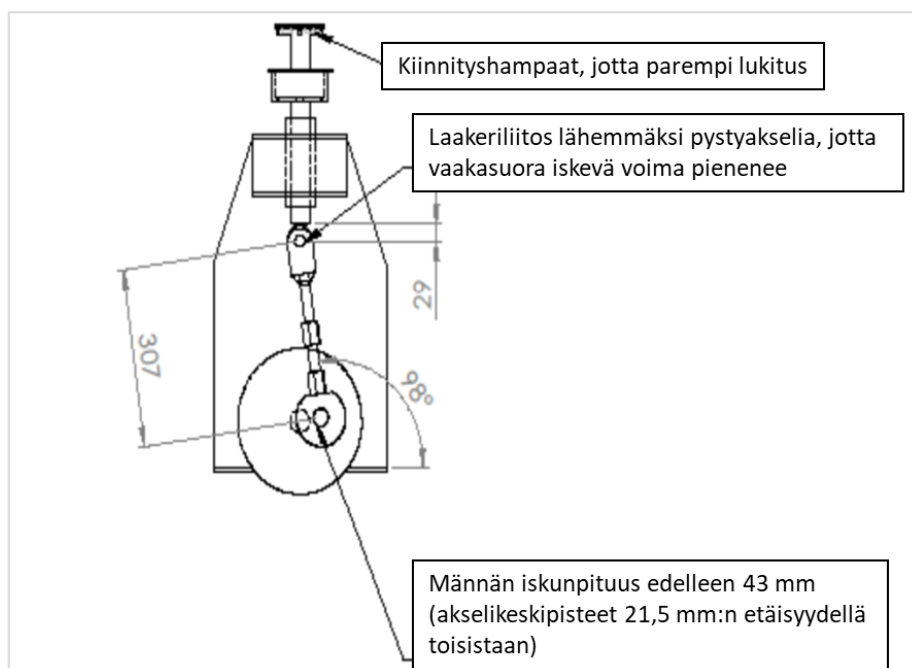


Kuva 27. Prall-menetelmän keskeiset kehitysehdotukset.

Similän (2018) mukaan Prall-menetelmän haasteena on edelleen sekä eri laitteilla että samalla laitteella saatavien tulosten hajonta. Erojen syynä on laitteiden kulumisen sekä erot laitteissa ja niiden perustamistavoissa. Huomattavaa on myös se, että kulumisen myötä laitteet antavat tuloksena enemmän liian suuren kuin liian pienen Prall-kuluman. Similän mukaan eroja voitaisiin pienentää Prall-laitteen modifioinnilla pienentämällä sivuliikkeitä ja kiihtyvyyttä sekä poistamalla välyksiä. Kiertokangen pidentämisellä vähennettäisiin vaakavoimia ja liukulaakerin kulumista. Kiertokangen pituus on määritetty standardissa, mutta muutos voitaisiin kuitenkin tehdä standardin mukaisen männän iskunpituuden puitteissa. Muita Similän esittämiä muutoksia laitteeseen on muun muassa liukulaakerin vaihtaminen kestävämmäksi, liukulaakerin välyksen muuttaminen, rullalaakerin vaihtaminen kestävämmäksi, akselitapin ja -haarukan koivuuden muuttaminen sekä testikammioon ylimääräisen tiivisterenkaan lisääminen ja kannen kiinnityksen muuttaminen. Välysten poistamisen jälkeen myös laitteen kulumista olisi helpompi seurata. Nykyinen laite on esitetty kuvassa 28 ja modifiointiehdotukset kuvassa 29. Similän mukaan laitteen modifioinnin jälkeen näytteiden tulosten välinen hajonta on pienentynyt. Tässä tutkimuksessa käytetään Similän modifioinnin mukaisesta laitteesta lyhennettä Prall<sub>s</sub>.



Kuva 28. Nykyinen laite (muokattu lähteestä Similä 2018).

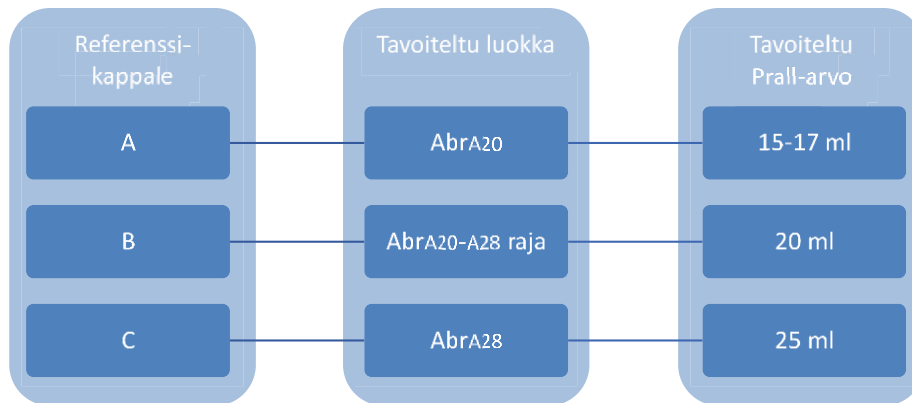


Kuva 29. Ehdotus laitteen modifioinnista eli Pralls-laite (muokattu lähteestä Similä 2018).

Lisäksi Similän (2018) mukaan Prall-menetelmään tulisi löytää tasalaatuinen referenssimateriaali, sillä standardin mukaisesta kalibroinnista ei ilmene laitteen kulumisen. Myös Viman (2011) ja Waldemarson (2018) ovat nostaneet esiin referenssikappaleen kehittämisen ja Forstén (2017) on ehdottanut homogeenista kalibrointimateriaalia. Referenssikappaleessa rinnakkaisnäytteiden välillä



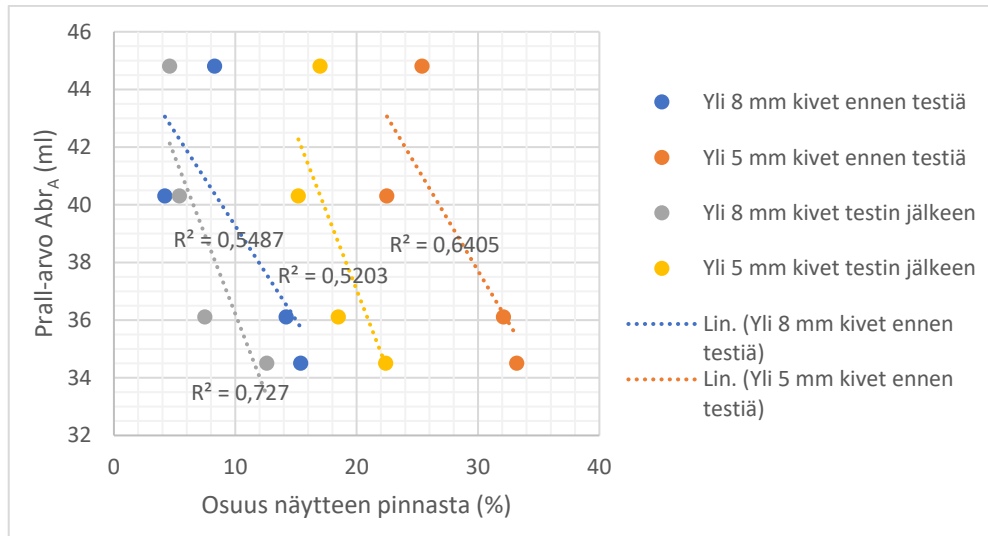
tulisi olla pieni hajonta, ja kappaleen Prall-arvon tulisi olla noin 10–20 ml (Similä 2018). Similä (2020) on testannut referenssimateriaaliksi useita synteettisiä ja tehdasvalmisteisia materiaaleja, kuten pihalaattaa, tiiliä, seinälaattoja, kallio-kairanäytteitä ja vuolukiveä. Haasteena on kuitenkin ollut löytää sopiva materiaali, sillä testatuissa materiaaleissa on ollut joko liian suuri tai pieni kuluma verrattuna asfalttiin, materiaalien hajonta on ollut suurta asfaltin tapaan tai koe-kappale on hajonnut testissä. (Similä 2018) Tämän vuoksi Similä on kehittänyt referenssikappaleeseen soveltuvan SMA 11 -reseptin, ja tavoitteena onkin kehittää referenssikappaleet kolmelle eri Prall-tasolle. (Similä 2020) Nämä on esitetty kuvassa 30.



Kuva 30. Similän suunnittelemat referenssikappaleet.

Referenssikappaleen A massan resepti on valmis, mutta kahden muun kehitys on vielä kesken. Similän mukaan reseptillä saadaan tasalaatuisia referenssikappalesarjoja, kun kappaleet lajitellaan ensin ulkonäön ja päällysteen tiheyden mukaan. Referenssikappaleita A on vertailtu laboratorioden välillä, mutta tuloksia ei vielä ole saatavilla. (Similä 2020)

Waldemarson (2018) ehdotti, että Prall-arvon ohella voitaisiin hyödyntää kuva-analyysia. Näytteistä voitaisiin ottaa valokuvat ennen Prall-testiä ja Prall-testin jälkeen sekä verrata kivipinta-alan osuutta Prall-arvoon. Myös Bäckström (2017) ehdotti kuvankäsittelyohjelman kehittämistä, minkä avulla voitaisiin luoda kerroin ja korjata muun muassa kivien pinta-alan aiheuttamaa hajontaa näytteiden välillä. Viman (2011) tutki alustavasti kuva-analyysin hyödyntämistä analysoimalla neljän SMA 8 -näytteen pinnasta yli 5 ja 8 mm rakeiden osuuden ennen ja jälkeen Prall-testiä sekä vertasi niiden pinta-alaa saatuun Prall-arvoon. Tutkimuksen tulosten perusteella kuva-analyysi vaikutti toimivalta keinolta: mitä enemmän suuria kiviä näytteen pinnassa oli ennen ja jälkeen testin, sitä pienempi saatu Prall-arvo oli. Kuvassa 31 on esitetty Vimanin havainnot kuva-analyysista.



Kuva 31. Vimanin (2011) havainnot SMA 8 -näytteiden kuva-analyysistä.

Vimanin (2011) mukaan kuva-analyysimenetelmää tulisi kuitenkin kehittää ja tutkia lisää.

## 5 Nastarengaskulumiskestävyyteen vaikuttavat tekijät

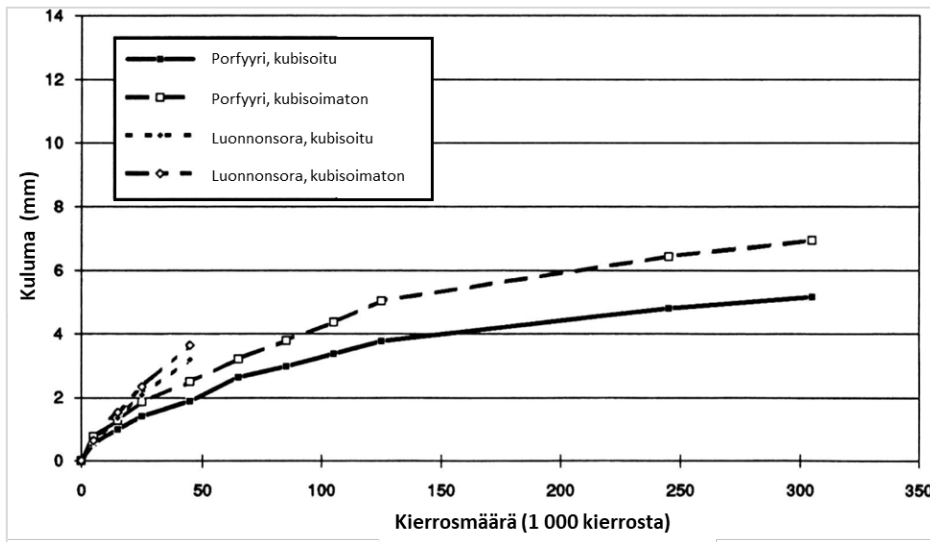
Pohjoismaissa on tutkittu kiviaineksen laadun vaikutusta päällysteen nastarengaskulumiskestävyyteen: karkean kiviaineksen muodon ja lujuuden vaikutusta kulumiseen on tutkittu sekä kiviaineksen kuulamylyarvon että päällysteen Prall-arvon, SRK-arvon, koetielaitteen ja tiekulumien avulla. Lisäksi on tutkittu muiden tekijöiden, kuten päällysteen tyhjätilan, hienon kiviaineksen ominaisuuksien ja kiviaineksen mineralogian, vaikutusta päällysteen nastarengaskulumiseen. Näiden pohjalta Pohjoismaissa on luotu yksinkertaisia malleja päällysteen nastarengaskulumisen ennustamiseksi ja päätöksenteon tueksi. Pohjoismaiden lisäksi myös Yhdysvalloissa on tutkittu päällysteen nastarengaskulumiseen vaikuttavia tekijöitä.

### 5.1 Kiviaineksen muodon ja lujuuden vaikutus kulumiskestävyyteen

Kiviaineksen litteyslukua voidaan parantaa murskausprosessissa monivaiheisella murskauksella, esimerkiksi käyttämällä kiviaineksen loppumuotoiluun keskipakomurskainta. Keskipakomurskaimella tehtävää kiviaineksen muotoilua kutsutaan yleisesti kubisoinniksi. Keskipakomurskaimessa osa kiviaineksesta tippuu murskaimen keskeltä ja osa reunoilta ja keskeltä tippuva kiviaines singotaan päin reunoilta tippuvaa kiviainesta. Vuorisen et al. (1998) mukaan keskipakomurskaimella muotoilulla on mahdollista suurimmillaan parantaa asfalttikiviaineksen karkean lajitteen litteyslukua noin 15 yksikköä, esimerkiksi litteyslukutasolta 20 litteyslukutasolle 5. Keskipakomurskaimella tehtävällä muotoilulla rakeista voidaan myös saada eheämpiä ja samalla kivirakeiden lujuus voi kasvaa (Vuorinen et al 1998). Sorrin (2019) mukaan osa tilaajista kieltää kubisoinnin ja osa taas määrää sen tehtäväksi. *Tierakenteen suunnittelu* -ohjeen mukaan kiviaineksen murskausmenetelmästä johtuen kiviaineksen kuulamylyarvo voi parantua enemmän kuin valmiin päällysteen kulumiskestävyys (Liikennevirasto 2018).

Jacobson (1994) tutki kubisoinnin vaikutusta kiviaineksen kuulamylyarvoon. Tutkittavat kiviainekset olivat porfyryri ja muun muassa graniittia ja gneissiä sisältävä luonnonsora. Porfyyrin kuulamylyarvo ennen kubisointia oli noin 5,5 ja luonnonsoran noin 12,5. Tutkimuksessa kubisoinnin havaittiin parantavan porfyyrin kuulamylyarvoa 31 % eli noin 1,5 yksikköä ja luonnonsoran 22 % eli noin 3 yksikköä. Samassa tutkimuksessa selvitettiin myös eri muotoisten kiviainesten vaikutusta päällysteen kulumiseen minikoetiejärjestelyillä. Minikoetiellä juuri päällystetyn moottoritien päällysteeseen jyrättiin ura, johon kiinnitettiin laboratoriossa SMA 16 -asfalttimassasta valmistetut päällystelaatat (47,5 x 75 x 4 cm). Asfalttimassaan vaihdettiin kubisoitua ja kubisoimatonta kiviainesta. Laattojen viereen noin 20 mm päällysteen pinnan alapuolelle asennettiin kiinnikkeet, joiden avulla laattojen kulumaa voitiin mitata laserprofilometrillä. Laattojen kuluma mitattiin kahden talven jälkeen. Tutkimuksessa kubisoidusta kiviaineksesta tehtyjen koelaattojen kuluman havaittiin vähentyvän samassa suhteessa kuulamylyarvon muutoksen kanssa: kubisoinnin myötä päällystelaatan kuluma väheni porfyyrillä 30 % ja luonnonsoralla 20 %. (Jacobson 1994)

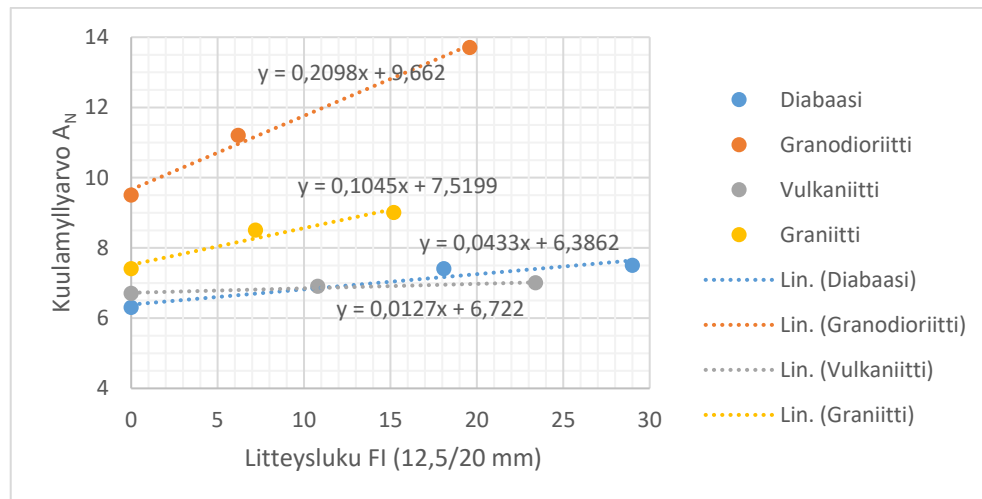
Jacobson (1992) tutki kiviainesten kubisoinnin vaikutusta päällysteen kulumaan myös VTl:n koetelaitteella. Porfyyrusta ja luonnonsorasta valmistettiin SMA 16 -massaa, ja yli 4 mm kiviainesta vaihdettiin kubisoituun ja kubisoimattomaan. Tutkimuksessa koetelaitteessa päällysteen kuluman havaittiin vähenevän kubisoinnin myötä noin 12–26 %. Porfyyrilla kubisoinnin vaikutus oli suurempi kuin luonnonsoralla, mutta porfyyrissa sisältäviä laattoja myös kulutettiin laitteessa enemmän kuin luonnonsoraa sisältäviä. Tutkimuksen tulokset on esitetty kuvassa 32.



Kuva 32. Kubisoinnin vaikutus päällysteen nastarengaskulumiseen koetelaitteessa SMA 16 -päällysteellä (muokattu lähteestä Jacobson 1992).

Vuonna 1998 Tampereen teknillisessä korkeakoulussa tutkittiin kiviaineksen litteysluvun vaikutusta kuulamylyarvoon graniitilla ja metavulkaniitilla. Tutkimuksessa modifioitiin kiviainesten litteyslukua ja pitkulaisten rakeiden osuuden kasvaessa kuulamylyarvo heikkeni jopa 3 yksikköä. (Kuula 2015) Myös Vuorinen (2000) tutki kiviaineksen muodon vaikutusta kuulamylyarvoon. Vuorisen havaintojen mukaan muodon vaikutus oli melko pieni ja riippui kivilajista: litteysluvun kasvaessa 10 yksikköä suureni kuulamylyarvo 0,1–2,7 yksikköä eli 1–11 %. Heikoilla kivillä muodon vaikutus kuulamylyarvoon oli suurin. Vastaavasti vaikutus oli pienin kivillä, joiden kuulamylyarvo oli lähtökohtaisesti hyvä ja kiintoiteisuus oli yli 2,9 Mg/m<sup>3</sup>.

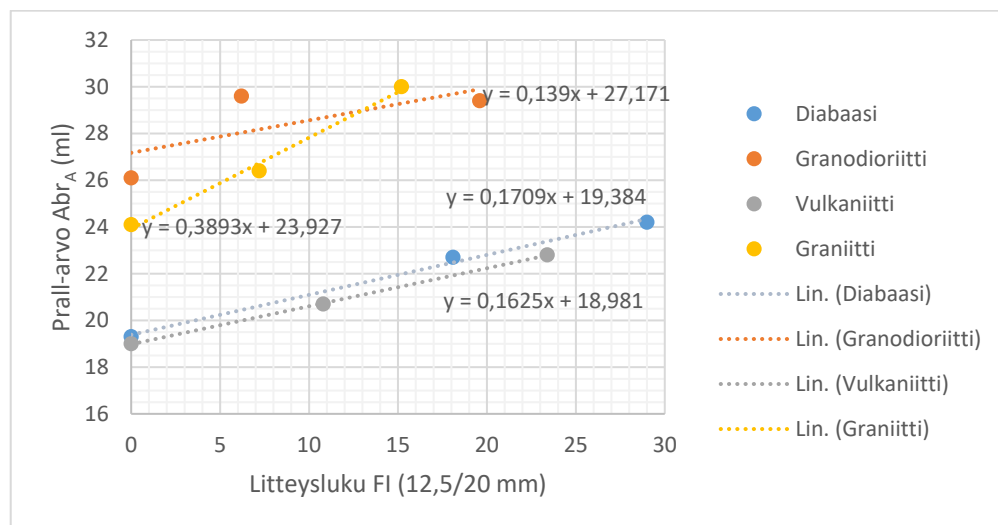
Alkion (2001) tutkimuksessa modifioitiin kiviaineksen litteyslukua ja tutkittiin sen vaikutusta kuulamylyarvoon. Kunkin kiviaineksen 8/12,5 ja 12,5/20 mm lajitteiden litteysluku modifioitiin välppäämällä kolmeen eri muotoluokkaan. Tutkimuksessa litteysluvun suurenemisen havaittiin suurentavan myös kuulamylyarvoa. Kuvassa 33 on esitetty tutkimuksen kiviainesten kuulamylyarvot sekä lajitteen 12,5/20 mm litteysluku.



Kuva 33. Litteysluvun vaikutus kuulamylyarvoon (muokattu lähteestä Alkio 2001).

Kuvasta 33 ilmenee, että granodioriitilla ja graniitilla muoto vaikutti eniten kuulamylyarvoon, kun taas diabaasilla ja vulkaniitilla vaikutus oli vähäisempi. Granodioriitilla 10 yksikön litteysluvun kasvu vaikutti jopa yli 2 yksikköä kuulamylyarvoon. Graniitilla 10 yksikön litteysluvun kasvu vaikutti noin 1 yksikön kuulamylyarvoon, kun taas diabaasilla ja vulkaniitilla vastaava muutos vaikutti noin 0,1–0,4 yksikköä kuulamylyarvoon.

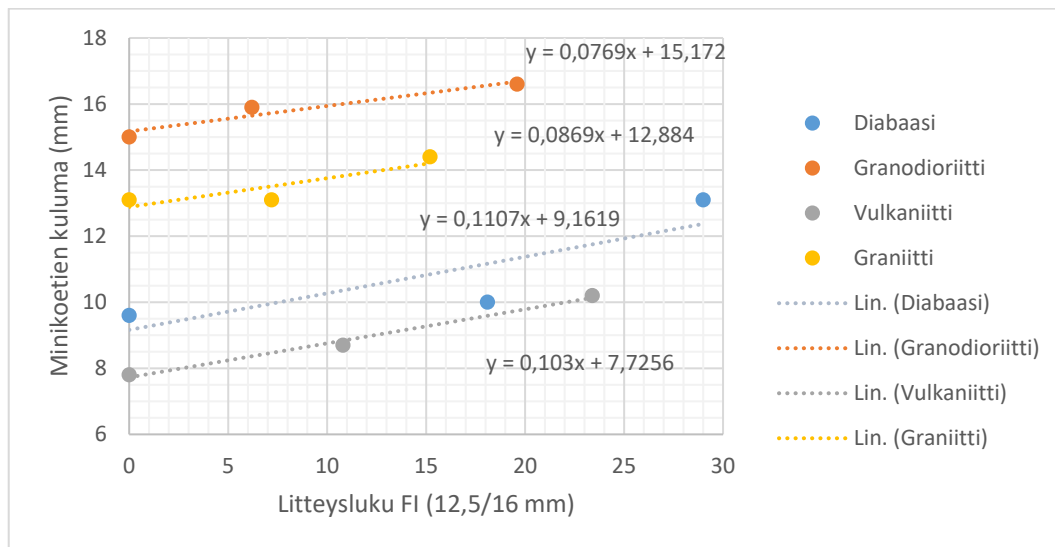
Alkio (2001) tutki myös samojen neljän kiviaineksen litteyslukumuutosten vaikutusta Prall-arvoihin. Kiviainesten 8/12,5 ja 12,5/20 mm lajitteiden litteysluku modifioitiin välppämällä kolmeen eri muotoluokkaan. Diabaasista ja granodioriitista valmistettiin SMA 18 -massaa, kun taas graniitista ja vulkaniitista SMA 20 -massaa. Kaikissa massoissa käytettiin alle 8 mm lajitteena granodioriittia ja yli 8 mm lajitetta vaihdettiin välppätyihin kiviaineksiin. Asfalttimassat sisälsivät kalkkikivijauhetta 11–12 % ja sideainetta 5,5–6,9 %. Tutkimuksessa Prall-arvon havaittiin kasvavan kiviaineksen litteysluvun kasvaessa. Kuvassa 34 on esitetty tutkimuksessa saadut Prall-arvot ja lajitteen 12,5/20 mm litteysluku.



Kuva 34. Litteysluvun vaikutus Prall-arvoon SMA 18- ja SMA 20 -näytteillä (muokattu lähteestä Alkio 2001).

Kuvasta 34 nähdään, että litteysluvun muutos vaikutti eniten graniitista valmistetun näytteen Prall-arvoon: graniitilla muutos oli lähes 4 yksikköä 10 yksikön litteysluvun muutosta kohden. Muilla kivilajeilla Prall-arvon muutos oli noin 1,4–1,7 yksikköä 10 yksikön litteysluvun muutosta kohti.

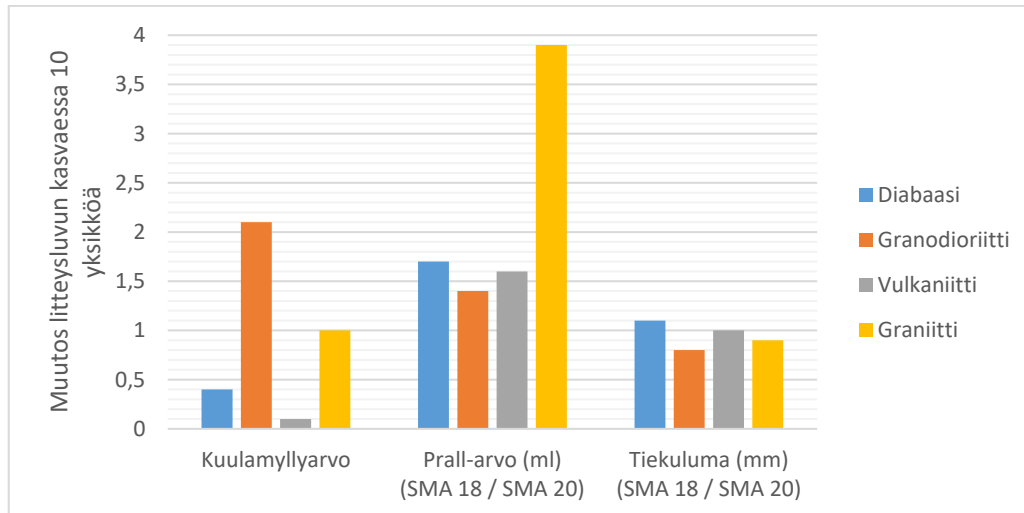
Vuorinen et al. (1998) tutkivat kiviaineksen raemuodon vaikutusta SMA-päällysteen kulumiskestävyyteen minikoetiejärjestelyillä. Tutkimuksessa käytettiin samoja kiviaineksiä ja asfalttimassoja kuin aiemmin esitettyssä Alkion (2001) tutkimuksessa. Asfalttimassoista valmistettiin kaksi päällystelaattaa (50 x 70 x 6 cm) laboratorioissa ja ne asetettiin Turun moottoritielle jyrskittyihin koloihin. Keskimääräinen vuorokausiliikenne osuudella oli noin 27 500. Kulumia mitattiin laserprofilometrillä kolmena talvena ennen ja jälkeen nastarengaskauden. Kolmen talven tiekulumat ja 12,5/20 mm lajitteen litteysluvut kivilajikohtaisesti on esitetty kuvassa 35.



Kuva 35. Litteysluvun vaikutus minikoetien kulumaan kolmen talven aikana SMA 16- ja SMA 20 -päällysteillä (muokattu lähteestä Vuorinen et al 1998).

Kuvasta 35 nähdään, että kaikilla kiviaineksilla 10 yksikön litteysluvun suureneneminen kasvatti kolmen talven kulmaa noin 0,8–1,1 mm. Muutos oli suurin diabaasilla, kun taas pienin granodioriitilla.

Vuorisen et al. (1998) ja Alkion (2001) tutkimuksissa litteysluvun muutoksen havaittiin vaikuttavan nastarengaskulumista kuvaaviin parametreihin. Kuvaan 36 on koottu kivilajeittain kuulamylyarvon, Prall-arvon ja kolmen talven minikoetiekuluman likimääräiset muutokset litteysluvun 10 yksikön kasvua kohti.

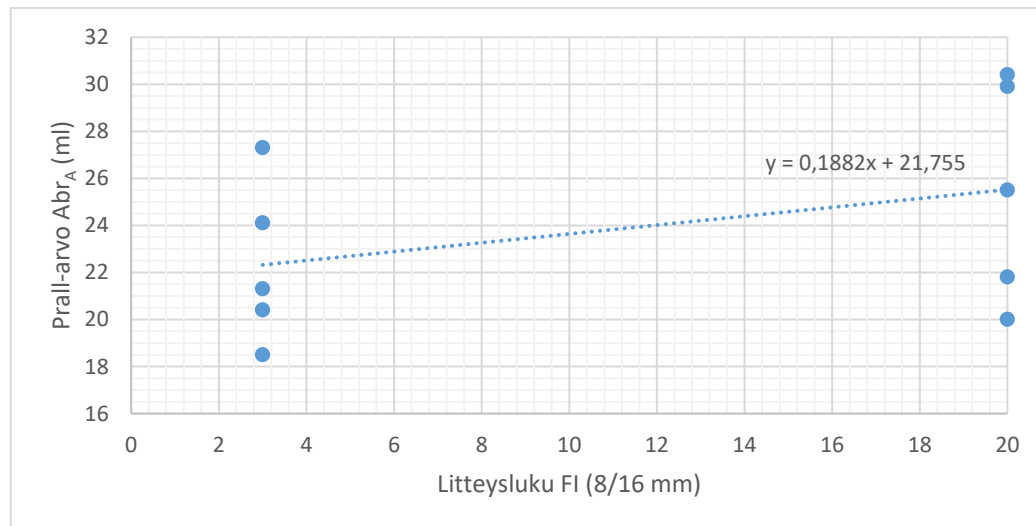


Kuva 36. Muutos eri nastarengaskulumista kuvaavissa parametreissa litteysluvun 10 yksikön kasvua kohti Vuorisen et al. (1998) ja Alkion (2001) tutkimuksissa.

Kuvasta 36 nähdään, että litteysluvun 10 yksikön muutoksen vaikutus ilmenee tutkituilla kiviaineksilla eri testeissä eri tavoin. Litteysluvun muuttuessa kuulamylyllyarvo muuttui vähiten vulkaniitilla ja diabaasilla, kun taas graniitilla ja erityisesti granodioriitilla litteysluvun muutos vaikutti kuulamylyllyarvoon enemmän. Prall-arvossa vastaava litteysluvun muutos aiheutti vulkaniitilla, diabaasilla ja graniitilla samankaltaisen muutoksen, mutta graniitilla muutos oli huomattavasti muita suurempi. Tiekulumat muuttuivat kiviaineksen muodon muuttuessa kaikilla kiviaineksilla samaan tapaan, ja tässä graniitilla ja granodioriitilla muutokset olivat pienimpiä.

Hietala ja Kuula (2019) tutkivat litteysluvun vaikutusta kuulamylyllyarvoon. Tutkimuksessa havaittiin kuulamylyluokkien  $A_{N10}$  ja  $A_{N14}$  kiviainesten kuulamylyllyarvon suurenevan keskimäärin 0,5–1,0 yksikköä litteysluvun kasvaessa 10 yksikköä. Tutkimuksessa litteysluvun muuttamisen havaittiin vaikuttavan kuulamylyllyarvoon eniten kvartsirakeita sisältävällä hienorakeisella porfyriitilla. Tällöin litteysluvun kasvaessa 10 yksikköä kuulamylyllyarvo suureni noin yhden yksikön. Graniittisilla kivillä muodon vaikutus kuulamylyllyarvoon havaittiin olevan hieman tätä pienempi, ja hienorakeisella porfyriitilla litteysluvun muuttaminen ei vaikuttanut juurikaan kuulamylyllyarvoon. Litteysluvun muuttamisen vaikutus kuulamylyllyarvoon oli suurin suuntautuneella kiviaineksella, kun taas suuntautumattomalla ja kovalla kiviaineksella litteysluvun muuttaminen vaikutti kuulamylyllyarvoon vähiten.

Hietalan ja Kuulan (2019) tutkimuksessa selvitettiin myös litteysluvun vaikutusta Prall-arvoon modifioidulla Prall<sub>5</sub>-laitteella. Kivilajina oli kvartsirakeita sisältävä hienorakeinen porfyriitti. Näytteet valmistettiin AB 16 -massasta ja lajitteen 8/16 mm litteyslukua modifioitiin arvoin 3 ja 20. Asfalttimassan suhteitus pidettiin muutoin vakiona. Molemmista asfalttimassoista valmistettiin päällystelaatat, joista porattiin viisi näytekappaletta. Tutkimuksessa litteysluvun arvolla 3 Prall-testien tulokseksi saatiin keskimäärin 22,3 ml, kun taas litteysluvun arvolla 20 saatiin keskiarvoksi 25,5 ml. Litteysluvun 10 yksikön suurentaminen suurensi siis Prall-arvoa noin 1,9 yksikköä. (Hietala & Kuula 2019) Tutkimuksen Prall-tulokset litteyslukutasoittain on esitetty kuvassa 37.



Kuva 37. AB 16 -näytteiden Prall-tulokset litteyslukutasoittain (muokattu lähteestä Hietala & Kuula 2019).

Göransson et al. (2018) vertailivat eri muotoisilla kiviaineksilla saatavia kuluma-arvoja VTl:n koetelaitteella ja Prall-laitteella. Tutkimuksessa valmistettiin AB 16 -massaa kubisoidusta ja kubisoimattomasta kiviaineksesta. Kubisoidusta kiviaineksesta valmistetulla päällysteellä kuluma koetelaitteessa havaittiin olevan noin 20 % pienempi kuin kubisoimattomasta kiviaineksesta valmistetulla. Molemmista kiviaineksista valmistetuilla massoilla Prall-arvot olivat kuitenkin samankaltaisia: kubisoidulla kivellä Prall-arvo oli 33,0 ml ja kubisoimattomalla 32,3 ml.

Asfalttikiviaineksen muodon vaikutusta päällysteen kulumiseen on tutkittu aiemmin SRK-laitteella. Kurki et al. (1992) tutkivat kiviaineksen kubisoinnin vaikutusta SRK-arvoon granodioriitilla ja gabrolla. Sekä kubisoimattomista että kubisoiduista kiviaineksista valmistettiin rakeisuudeltaan epäjatkovaa ABE 20 -massaa. Asfalttimassoista valmistetuista päällystelaatoista otetut näytteet testattiin SRK-laitteella. SRK-arvot olivat kubisoimattomista kiviaineksista valmistetuilla näytteillä noin 43–45 ml. Kubisoinnin havaittiin pienentävän SRK-kuluman arvoa granodioriitilla noin 10 yksikköä, kun taas gabrolla kubisointi suurensi SRK-kulumaa noin 1,5 yksikköä. Tutkimuksessa valmistettiin myös granodioriitista jatkuvaa AB 20 -massaa kahden eri murskauserän eri muotoarvoisilla kivillä. Puikkoisemmasta kiviaineserästä valmistetun näytteen SRK-arvo oli 51,5 ml ja vähemmän puikkoisesta erästä valmistetun näytteen SRK-arvo noin 2,5 yksikköä pienempi. Näiden lisäksi tutkimuksessa selvitettiin kubisoinnin vaikutusta päällysteen kulumiseen yhdellä koetiellä kahdella eri kiviaineksella. Lujemman kiviaineksen eli vulkaniitin kubisoinnin havaittiin vähentävän päällysteen kulumista, mutta heikomman kiviaineksen eli gneissin kubisoinnin ei havaittu vähentävän kulumista. Tutkimuksessa vulkaniitin LA-luku oli 18 ja gneissin LA-luku 30 (ASTO-loppuraportti 1993).



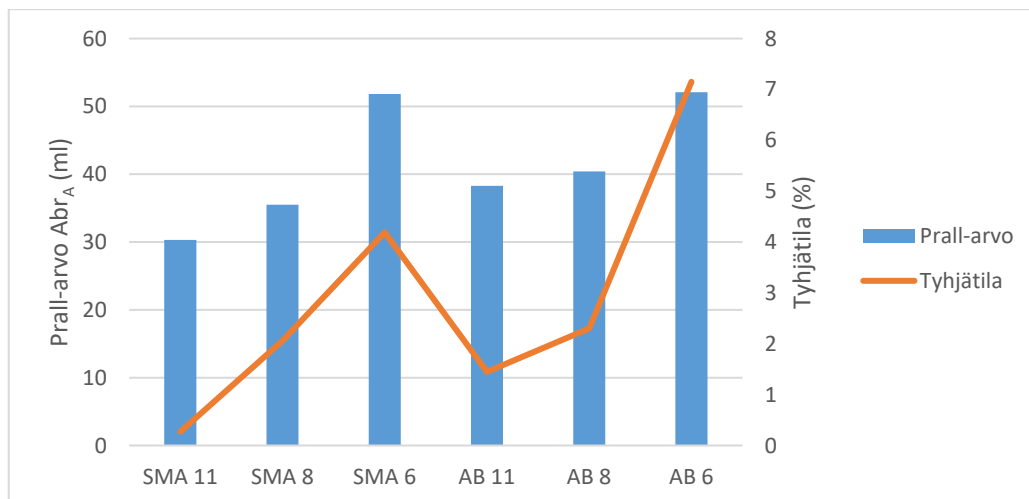
## 5.2 Muut kulumiskestävyyteen vaikuttavat tekijät

### 5.2.1 Näytteen tyhjätila

Prall-arvoon vaikuttaa näytteen tiheys ja tyhjätila. Vuonna 2006 VTT:n tekemässä vertailukokeessa huomattiin yhteys massan tiheyden ja Prall-arvon välillä lujuudeltaan heikommilla kiviaineksilla. Sen sijaan lujilla kivillä vastaavaa riippuvuutta ei havaittu. (Laaksonen et al 2008) Pellinen ja Makowska (2015) tutkivat REM-menetelmällä tehtyjen päällysteiden kulumiskestävyyttä ja havaitsivat Prall-arvon kasvavan noin 4 yksikköä näytteen tyhjätilan kasvaessa prosenttiyksiköllä. Myös Hietala ja Kuula (2019) havaitsivat Prall-arvon pienenevän näytteen tiheyden kasvaessa.

Vimanin ja Hakimin (2010) tutkimuksessa vertailtiin laboratorioden välillä tieltä porattujen näytteiden Prall-arvoja. Prall-arvojen havaittiin pienenevän näytteen tiheyden kasvaessa, mutta välillä ei havaittu kuitenkaan vahvaa korrelaatiota. Myöskään Liikenneviraston vuonna 2016 teettämässä laboratorioden välisessä vertailukokeessa näytteiden tyhjätilan ja Prall-arvon välillä ei havaittu vahvaa korrelaatiota (Bäckström 2017).

Lerfard (2007) tutki maksimiraekoon vaikutusta Prall-arvoon. Testattavia asfalttimassoja olivat SMA 11, SMA 8, SMA 6, AB 11, AB 8 ja AB 6. Prall-arvon havaittiin suurenevan asfalttimassan maksimiraekoon pienentyessä, ja lisäksi AB-massojen havaittiin kuluvan enemmän kuin vastaavan maksimiraekoon SMA-massat. Näytteiden tyhjätilat kuitenkin suurenivat maksimiraekoon pienentyessä. Lerfaldin mukaan tämä saattoi vaikuttaa tuloksiin, joten tuloksista olikin haastava erotella maksimiraekoon ja tyhjätilan vaikutusta Prall-arvoon. Tutkimuksen Prall-arvot ja tyhjätilat on esitetty kuvassa 38.



Kuva 38. Maksimiraekoon vaikutus Prall-arvoon (muokattu lähteestä Lerfald 2007).

## 5.2.2 Eri lajitteiden ominaisuudet

Myös asfalttikiviaineksen eri lajitteiden lujuuksien vaikutusta Prall-kulumaan on tutkittu. Robertsen (2018) tutki heikon kiviaineksen hyödyntämistä asfalttimassassa. Tutkimuksessa valmistettiin SMA 11 -massaa, jossa bitumipitoisuus oli 5,9 %. Tutkimuksessa oli kahta eri kiviainesta: lujemman kiviaineksen kuulamylyarvo oli noin 5 ja heikomman noin 30. Asfalttimassaa valmistettiin kokonaan lujemmasta kiviaineksesta, kokonaan heikommasta kiviaineksesta sekä vaihtamalla kiviainesta 8 mm kohdalla. Kokonaan lujemmasta kiviaineksesta valmistettujen asfalttinäytteiden Prall-arvo oli noin 24 ml ja kokonaan heikommasta kiviaineksesta valmistettujen näytteiden Prall-arvo noin 35 ml. Heikommalla kiviaineksella Prall-arvo oli siis 48 % suurempi kuin lujemmalla kivellä. Näytteet, joissa 0/8 mm lajite oli heikompaa kiviainesta, kuluivat lähes samaan tapaan kuin kokonaan lujasta kivistä valmistetut. Näiden välillä Prall-arvossa eroa oli vain 5 %. Kun taas 8/11 mm lajite oli heikompaa kiviainesta, Prall-arvo oli noin 32 % suurempi kuin kokonaan lujasta kiviaineksesta valmistettujen näytteiden. Tutkimuksessa havaittiin siis yli 8 mm lajitteen lujuuden vaikuttavan Prall-arvoon. On kuitenkin huomioitava, että kuulamylyarvojen ohella myös kiviainesten litteysluvut vaihtelivat: lujemmalla kivellä litteysluku oli 6 ja heikommalla 19.

Siebert ja Mork (2016) tutkivat alle 4 mm lajitteen lujuuden vaikutusta asfalttimassan Prall-arvoon. Tutkimuksessa valmistettiin kolmesta eri kiviaineksesta AB 8-, AB 11-, AB 16-, SMA 8-, SMA 11- ja SMA 16 -asfalttimassoja. Asfalttimassat tehtiin joko kokonaan yhdestä kiviaineksesta tai kahden kiviaineksen yhdistelmästä niin, että lajite vaihtui 4 mm kohdalla. Tutkimuksessa kiviaineksina oli porfyryri, gabro ja montsoniitti: porfyyrin kuulamylyarvo oli noin 4, gabron 11 ja montsoniitin 14. Yhteensä eri kiviainesyhdistelmistä valmistettiin 19 eri asfalttimassaa. Tutkimuksessa havaittiin yhteys yli 4 mm lajitteen kuulamylyarvon ja Prall-arvon välillä, mutta alle 4 mm lajitteen lujuudelle yhteyttä ei havaittu. Tutkimuksessa ei tutkittu kiviaineksen litteysluvun vaikutusta kulumaan.

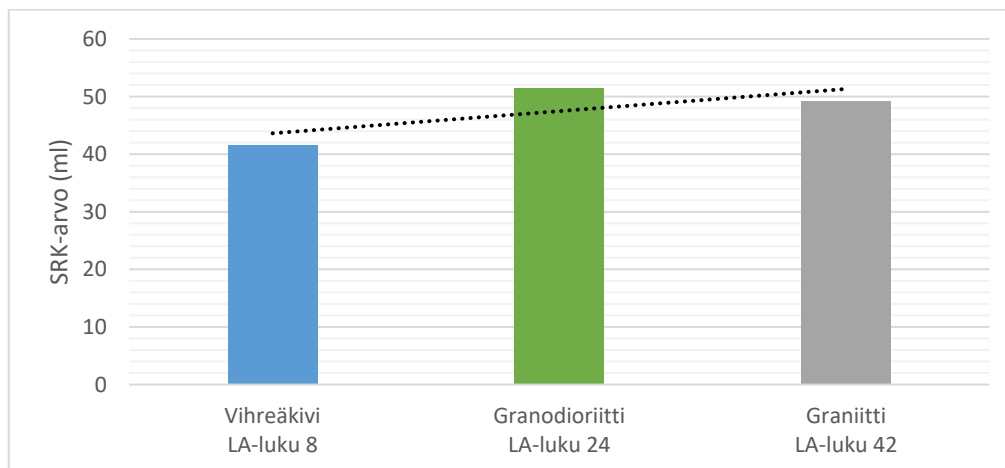
Erichsen et al. (2010) tutkivat asfalttikiviaineksen lujuutta ja muotoa eri lajitteilla. Näiden perusteella arvioitiin teoreettisesti eri asfalttimassojen suhteitukseksi kulutuskestävyysarvot. Lajitteille 8/11,2 ja 11,2/16 mm tehtiin kuulamylykokeet, ja lisäksi 4/8 mm lajitteelle arvioitiin kuulamylyarvo Micro-Deval-arvon perusteella. Tutkimuksen kivilajit, kuulamylyarvot ja litteysluvut on esitetty taulukossa 16.

*Taulukko 16. Erichsenin et al. (2010) tutkimuksen lajitteiden litteysluvut ja kuulamylyarvot.*

Kivilaji	11,2/16 mm		8/11,2 mm		4/8 mm	
	Litteysluku	Kuulamylyarvo	Litteysluku	Kuulamylyarvo	Litteysluku	Arvioitu kuulamylyarvo
Porfyryri	2,9	5,0	13,0	5,6	36,9	13,2
Gabro	1,6	11,6	3,0	11,0	8,3	13,2
Montsoniitti	3,7	15,1	8,9	15,3	25,4	24,9

Kaikilla kiviaineksilla lajitteen 11,2/16 mm muoto oli hyvä. Kiviaineksista parhaimman muotoista oli gabro, kun taas porfyryri ja montsoniitti olivat raemuodoltaan heikompia erityisesti 4/8 mm lajitteessa. Kuulamylyarvojen pohjalta arvioitiin eri AB- ja SMA-massojen suhteituksille kuulamylyarvot. Maksimiraekooltaan 11 ja 16 mm:n massoissa porfyryri oli kulutuskestävyydeltään parasta. Maksimiraekooltaan 8 mm:n massoissa taas kulutuskestävyydet olivat likimain samat porfyryrilla ja gabrolla, vaikka gabron kuulamylyarvo oli suurirakeisimmilla lajitteilla lähes 6 yksikköä heikompi. Kiviaineksen raemuoto vaikutti siis huomattavasti arvioituun kulutuskestävyyteen. Montsoniitilla kulutuskestävyys oli selvästi kahta muuta heikompi kaikissa suhteituksissa, ja tätä selitti heikon kuulamylyarvon ja raemuodon yhteisvaikutus. (Erichsen et al 2010) Täytyy kuitenkin huomioida, että tutkimuksessa kulutuskestävyyden arvioinnissa käytettiin Micro-Deval-arvoja. Esimerkiksi Vuorinen (2000) havaitsi kiviaineksen raemuodon vaikuttavan osalla kiviaineksista eri tavoin Micro-Deval-arvoon ja kuulamylyarvoon. Erichsenin et al. (2010) tutkimusraportissa ehdotettiin, että suhteituksille saatuja kulutuskestävyyden tuloksia voisi vertailla Prall-arvoihin. Tutkimuksessa yritettiin myös tarkemmin arvioida eri kivilajien yhdistelmistä valmistettavien AB 11 -massojen suhteitusten kulutuskestävyyttä, mutta arviointi oli haastavaa johtuen eri lujuisista ja muotoisista lajitteista. Lisäksi tutkimuksessa havaittiin, että 8/11,2 ja 11,2/16 mm lajitteille tehty kuulamylytestit antoivat testatuilla kiviaineksilla hyvin samankaltaisia tuloksia.

Kurki et al. (1992) tutkivat asfalttikiviaineksen välilajitteen (0/8 mm) lujuuden vaikutusta SRK-kokeen tulokseen. Tutkittavana asfalttimassana oli AB 20 ja karkeana yli 8 mm lajitteena granodioriitti. Lajitetta 0/8 mm vaihdettiin kolmeen eri lujuiseen kivilajiin: vihreäkiven LA-luku oli 8, granodioriitin LA-luku oli 24 ja graniitin LA-luku oli 42 (ASTO-loppuraportti 1993). Kuvassa on 39 esitetty näytteille saadut SRK-arvot.



Kuva 39. Välilajitteen lujuuden vaikutus SRK-arvoon AB 20 -näytteillä (muokattu lähteistä Kurki et al 1992; ASTO-loppuraportti 1993).

Kurki et al. (1992) mukaan SRK-kokeessa havaittiin ero lujimman ja heikoimman välilajitteen välillä, sillä heikoimmalla kiviaineksella SRK-arvo oli noin 19 % suurempi kuin lujimmalla. Kuvasta 39 kuitenkin ilmenee, että granodioriitti eli LA-luvun perusteella lujuudeltaan keskimmäinen poikkeaa lineaarisesta linjasta. Tämä voi johtua siitä, että LA-testissä on kuivat olosuhteet, kun taas kuulamylytestissä ja SRK-kokeessa märät olosuhteet.

Alkio ja Vuorinen (1999) tutkivat kiviaineksen välilajitteen (0,4/2 ja 2/8 mm) muodon vaikutusta päällysteen kulumiskestävyyteen SRK-laitteella. Kiviaineksesta valmistettiin AB 16 -massaa vaihtaen välilajitetta. Tutkimuksessa kivilajeina olivat graniitti ja gabro. Tutkimuksen lajitteiden litteysluvut on esitetty taulukossa 17.

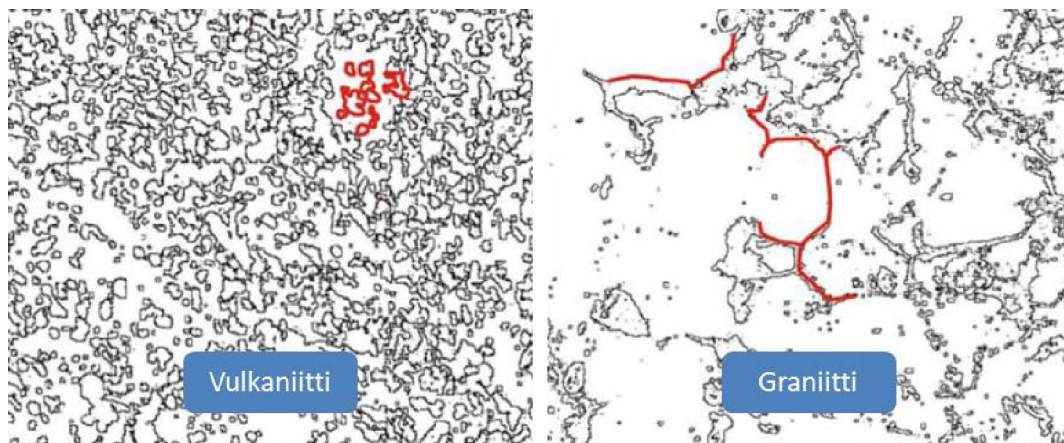
Taulukko 17. Alkion ja Vuorisen (1999) tutkimuksessa testattujen lajitteiden litteysluvut.

Kivilaji	Lajitteen 0,4/2 mm litteysluvut		Lajitteen 2/8 mm litteysluvut		
Graniitti	24	29	15	27	40
Gabro	19		12	23	34

Karkean lajitteen litteysluku oli graniitilla noin 18 ja gabrolla noin 13. Tutkimuksessa graniitista valmistetun hyvämuotoista välilajitetta sisältävän massan havaittiin kuluvan hieman vähemmän kuin huonomuotoista lajitetta sisältävän, mutta ero SRK-arvoissa oli vain 6 %. Gabrosta valmistetun massan välilajitteen muodolla ei havaittu olevan vaikutusta SRK-arvoon. Tutkimusten tulosten perusteella arvioitiin, että 0,4/2 mm lajitteen muodon vaikutus kulumiseen olisi huomattavasti pienempi kuin 2/8 mm lajitteen. (Alkio & Vuorinen 1999)

### 5.2.3 Kivilajityyppi

Myös kivilaji ja kiven mineralogia vaikuttavat kulumaan. VIEME-tutkimuksessa selvitettiin asfalttikiviaineksen mineralogian ja litteysluvun vaikutusta kuulamyllyarvoon. Tutkittavina kivilajeina oli kolmen eri louhoksen graniittia ja kolmen eri louhoksen vulkaniittia, joista tutkittiin 4/8, 8/11 ja 11/16 mm lajitteita. Tutkimuksessa litteysluvun havaittiin vaikuttavan kuulamyllyarvoon eniten 4/8 mm lajitteella. Samalla lajitteella havaittiin myös kivilajin vaikuttavan eniten kuulamyllyarvoon: vulkaniitit havaittiin lujemmiksi kuin graniitti, vaikka graniitin litteysluku olisi ollut pienempi kuin vulkaniitilla. Eron esitettiin johtuvan siitä, että vulkaniitissa on pinta-alayksikköä kohti enemmän sitovia kidepintoja ja kompleksisempia rajapintoja. (Liikenne- ja viestintäministeriö 2008) Tämä ilmenee kuvasta 40, jossa vasemmalla puolella on esitetty vulkaniitti ja oikealla graniitti.



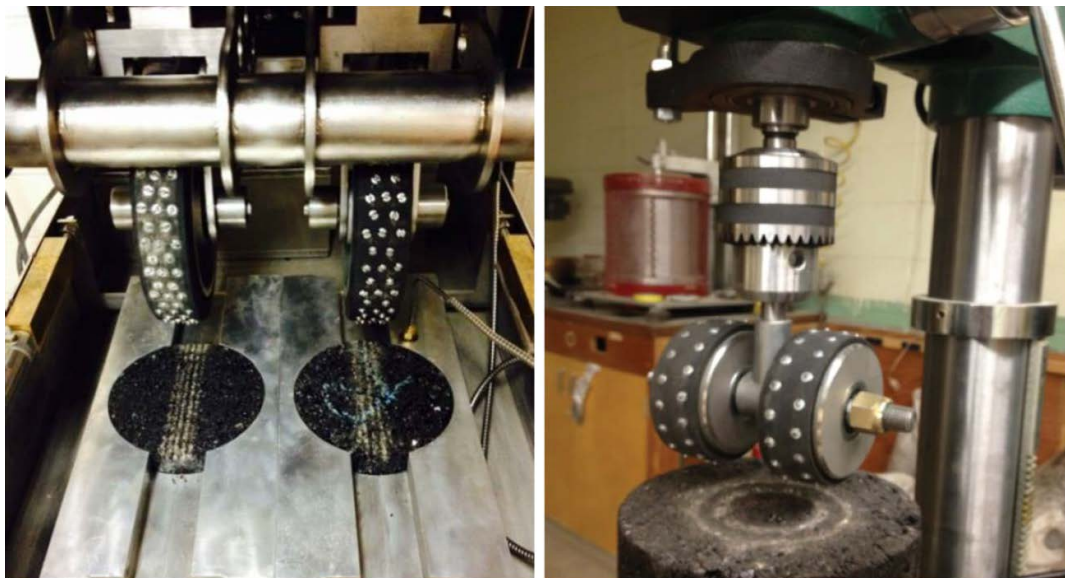
Kuva 40. Sitovien kidepintojen määrä vulkaniitilla ja graniitilla (muokattu lähteestä Liikenne- ja viestintäministeriö 2008).

Anastasio et al. (2017) tutkivat kiviaineksen mineralogian merkitystä asfalttipäällysteen kestävyys. Tutkimuksessa havaittiin kiviaineksen kvartsi- ja maasälpäpitoisuuden heikentävän päällysteen kestävyyttä vedenkestävyys- ja aineshaviötesteissä, mutta Prall-arvoissa tämä ei ilmennyt. Lisäksi mikrohalkeamien määrän havaittiin korreloivan päällysteen heikomman vedenkestävyyden kanssa. Tutkimuksen kiviaineksissa muskoviitin, biotiitin, kloriitin ja kalsiitin yhteenlasketut osuudet vaihtelivat kuitenkin välillä 17–44 %. Nämä ovat Asfalttinormeissa (2017) luokiteltu pehmeiksi mineraaleiksi, joita asfalttikiviaines ei saa sisältää yli 15 prosenttia ilman, että rapautumattomuus osoitetaan erikseen testeillä.

### 5.3 Nastarengaskulumisen simulointi Yhdysvalloissa

Pohjoismaiden lisäksi Alaskassa on myös jonkin verran tutkittu Prall-menetelmää. Alaskaan hankittiin vuonna 2003 Prall-laite ja vuosien 1998–2004 urautumisdatan perusteella arvioitiin Prall-menetelmän ja urautumisen korrelaatiota. Tutkimuksessa havaittiin näiden välillä kohtuullinen korrelaatio. Mukana testissä oli myös kulutuskestävyydeltään heikkoja päällysteitä, joiden Prall-arvot olivat 46 ja 50 ml. Tutkimuksen mukaan menetelmän korrelaatiota tiekulumiin tuli kuitenkin tutkia lisää. (Gartin & Saboundjian 2005) Vuonna 2016 Prall-menetelmä lisättiin Alaskan kansalliseen testausmenetelmiä käsittelevään ohjeeseen (Alaska Department of Transportation and Public Facilities 2016).

Washingtonissa päällysteiden nastarengaskulumista on tutkittu kuvassa 41 esitetyillä laitteilla.



Kuva 41. Washingtonissa käytetyt nastarengaskulumista simuloivat laitteet (Bahadori et al 2018; Wen & Bhusal 2014).

Bahadori et al. (2018) tutkivat eri tekijöiden vaikutusta nastarengaskulumiseen *Asphalt Pavement Analyzer (APA) Jr.* -laitteella, joka on esitetty kuvassa 41 vasemmalla puolella. Laitteessa asfalttinäytettä kuormitettiin 5 °C:n lämpötilassa yläpuolelta 45 kilogrammalla ja samalla kumiset nastarenkaat pyörivät 8 000

kierrosta. Tuloksena mitattiin uran syvyyttä ja massahäviötä. Tutkimuksessa ei havaittu sideaineen, hienoaineksen osuuden, maksimiraekoon, kivilajin eikä sideaineen kumimodifioinnin vaikuttavan kulumaan. Tutkimuksessa tosin todettiin, että laitteella olisi tullut kuluttaa näytteitä pidempään erojen saamiseksi.

Wen ja Bhusal (2014) tutkivat eri tekijöiden vaikutusta nastarengaskulumiseen Washingtonin yliopistossa kehitetyllä nastarengaskulutusta simuloivalla laitteella, joka on esitetty kuvassa 41 oikealla puolella. Laitteessa on kaksi nastarengasta, jotka kohdistavat asfalttinäytteeseen noin 7 bar:in paineen yläpuolelta ja renkaita pyöritetään 140 kierrosta minuutissa. Kokeen jälkeen mitataan näytteen massahäviö. Tutkimuksessa käytettiin 2 minuutin kulutusaikaa ja lämpötilana oli 20 °C. Tutkittavia tekijöitä olivat muun muassa massatyypin, maksimiraekoko ja tyhjätilan. Tutkimuksessa SMA:n havaittiin kulumisen vähemmän kuin AB:n ja maksimiraekoon suurentamisen pienentävän massan kulumaa. Tyhjätilojen muuttumisella 4 prosentista 7 prosenttiin ei havaittu olevan vaikutusta kulumaan.

## 5.4 Nastarengaskulumisen ennustaminen

Vuonna 1998 Suomessa kehitettiin malli, joka soveltuisi päällysteiden urautumisnopeuden ennustamiseen. Päällysteen urautumisnopeutta arvioitiin ASTO-koeteiden vuosien 1990–1997 aikana tehtyjen mittausten perusteella. Tiekuluman ja SRK-kuluman välille saatiin yhteys Kouvolan ja Keravan koeteiden perusteella. Koetiet oli päällystetty EA 20 -massalla, ja niissä oli kolmea yhteistä kiviainesta. Vastaavista massoista tutkittiin SRK-arvot, jonka jälkeen koetiekulumat muutettiin vastaamaan SRK-kulumaa. Tämän jälkeen kuluman ja eri kiviainesten parametrien välille muodostettiin kaavat. Kuluman ja kuulamylyarvon väliseksi yhteydeksi saatiin (Kurki 1998)

$$\text{Laskennallinen SRK-arvo} = 1,68 \cdot KM + 13,39. \quad (4)$$

Kurjen (1998) mukaan kaavan luotettavuutta heikensi se, ettei kaikista kiviaineksista ollut määritetty kuulamylyarvoa. Lisäksi Keravan koetietä seurattiin vain kahden vuoden ajan ja Kouvolan koetiellä ajolinjat jakaantuivat Keravan koetietä laajemmalle alalle. Myös kiviainesten raemuodoissa saattoi olla eroja.

Tutkimuksessa määritettiin myös massatyypikertoimet, joilla SRK-kulumaa korjattiin. Massatyypikertoimien määrittäminen pohjautui vuonna 1993 rakennettuun koetiehen, jossa päällysteenä oli eri maksimiraekokoisia SMA-massoja ja kiviaineksena vulkaniittia. Vastaaville SMA-massoille tehtiin myös SRK-kokeet. Lisäksi tutkimuksessa arvioitiin ABE 20- ja AB 20 -massoille SRK-arvot kiviainestestien tulosten perusteella. Näiden perusteella luotiin kaava kulumalle massan sisältämän kiviaineksen rakeisuusjakauman 8 ja 16 mm läpäisyjen perusteella. Muiden koeteiden AB 20- ja SMA 16 -massojen kulumista verrattiin EA 20 -massaan, jolloin saatiin taulukon 18 mukaiset massatyypikertoimet. (Kurki 1998)



Taulukko 18. Kurjen esittämät massatyypikertoimet vuonna 1998 (Kurki 1998).

Massatyyppi	Massatyyppi-kerroin	Massatyyppi	Massatyyppi-kerroin
SMA 20 / EA 20	1,0	AB 20	1,21
SMA 16	1,1 (1,08)		

Näiden pohjalta luotiin urautumista kuvaava malli, jossa huomioitiin edellä esitettyjen ominaisuuksien lisäksi myös asfalttipäällysteen sideaine, nopeus, sää-alue sekä liikennemäärä. Urautumismallia testattiin kuudella koetiellä ja sen korrelaatioksi saatiin 0,94. (Kurki 1998)

Myöhemmin laskennallisen kulumisnopeuden kaavaa käytettiin tarjousten vertailussa. Vuoden 2001 Tiehallinnon julkaisussa aiempaa kaavaa on hieman pyöristetty ja kaava on esitetty muodossa (Tiehallinto 2001)

$$\text{Laskennallinen kulumisnopeus} = MT \cdot (1,7 \cdot KM + 13,4). \quad (5)$$

Julkaisussa on myös lisätty AB 16:lle massatyyppikerroin 1,3. Lisäksi julkaisussa mainitaan, että massatyyppikertoimien päivitys on käynnissä ja niitä täydennetään myös maksimiraekooltaan pienemmille massoille. (Tiehallinto 2001) Vuoden 2001 julkaisun massatyyppikertoimet on esitetty taulukossa 19.

Taulukko 19. Tiehallinnon julkaisun massatyyppikertoimet vuonna 2001 (Tiehallinto 2001).

Massatyyppi	Massatyyppi-kerroin	Massatyyppi	Massatyyppi-kerroin
SMA 22	1,0	AB 22	1,21
SMA 16	1,1	AB 16	1,3

Vuonna 2001 Kurki päivitti kulumismallin Vt 1:n minikoetietutkimusten vuosien 1995–1998 tulosten ja laboratoriotulosten perusteella huomioiden myös Vt 3:n vuosien 1999–2000 minikoetien sekä ASTO-koeteiden tulokset. Tarkoituksena oli tutkia muun muassa nastojen keventämisen vaikutusta kulumaan. Tutkimuksessa saatiin laskennallisen kulumisnopeuden kaavaksi (Alkio 2001)

$$\text{Laskennallinen SRK} - \text{arvo} = \frac{(MT \cdot (30 \cdot KM - 47) + 104)}{10,5}. \quad (6)$$

Lisäksi kulumaa korjattiin sideainekertoimella. Tutkimuksessa todettiin, että aiemmin kehitetty kiviaineksen 8 ja 16 mm läpäisyihin perustuva kaava ei päde pieniraekokoisilla massoilla. (Alkio 2001) Tässä tutkimuksessa käytetyt massatyyppikertoimet on esitetty taulukossa 20.

Taulukko 20. Kurjen esittämät massatyypikertoimet vuonna 2001 (Alkio 2001).

Massatyyppi	Massatyyppi-kerroin	Massatyyppi	Massatyyppi-kerroin
SMA 20	(1,0)	AB 25	(1,2)
SMA 16	1,1	AB 20	1,3
SMA 12	1,4	AB 16	1,6
SMA 8	1,7	AB 12	1,7

Tämän jälkeen Kurjen vuonna 2001 esittämän kaavan avulla luotiin uusi kaava vuosien 1998 ja 2001 kaavojen keskiarvosta. Asfalttinormien lisälehdessä (2002) laskennallisen kulumisnopeuden kaava esitettiin muodossa

$$\text{Laskennallinen kulumisnopeus} = MT \cdot (9,4 + 2,21 \cdot KM). \quad (7)$$

Asfalttinormien lisälehteen (2002) massatyypikertoimia muokattiin myös hie-man ja SMA 11:lle lisättiin kerroin 1,34 ja AB 11:lle kerroin 1,73. Kertoimet on esitetty taulukossa 21.

Taulukko 21. Massatyypikertoimet vuonna 2003 (Asfalttinormien lisälehti 2002).

Massatyyppi	Massatyyppi-kerroin	Massatyyppi	Massatyyppi-kerroin
SMA 20	1,0	AB 20	1,26
SMA 16	1,08	AB 16	1,46
SMA 11	1,34	AB 11	1,73

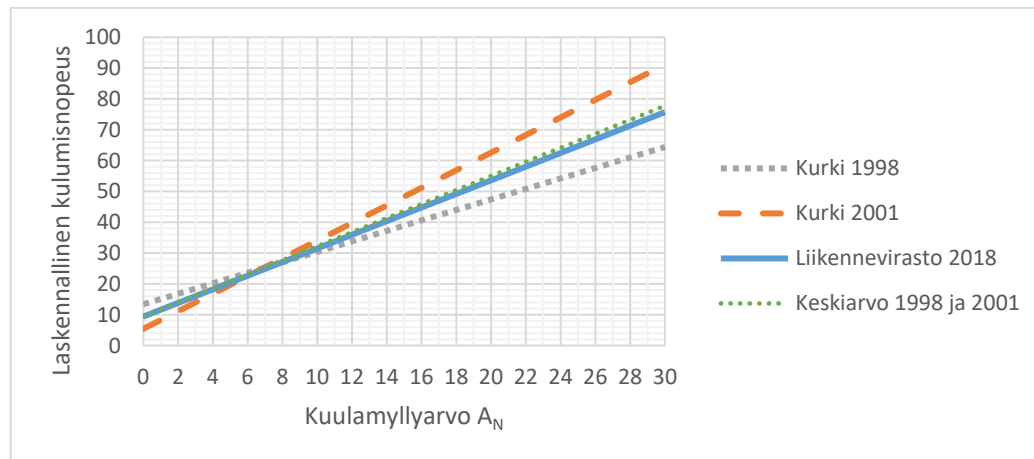
Laskennallisen kulumisnopeuden kaava on myös nykyisessä *Tierakenteen suunnittelu* -ohjeessa (2018) kaavassa 7 esitetyssä muodossa. Nykyiset massatyypikertoimet on esitetty taulukossa 22.

Taulukko 22. Massatyypikertoimet vuonna 2018 (Liikennevirasto 2018).

Massatyyppi	Massatyyppi-kerroin	Massatyyppi	Massatyyppi-kerroin
SMA 20-22	1,0	AB 20-22	1,26
SMA 16	1,08	AB 16	1,46

Kuvan 42 kuvaajassa on esitetty Kurjen vuosina 1998 ja 2001 esittämät laskennallisen kulumisnopeuden kaavat, niiden keskiarvo sekä nykyinen kulumisnopeuden kaava massatyypikertoimen ollessa 1,0.

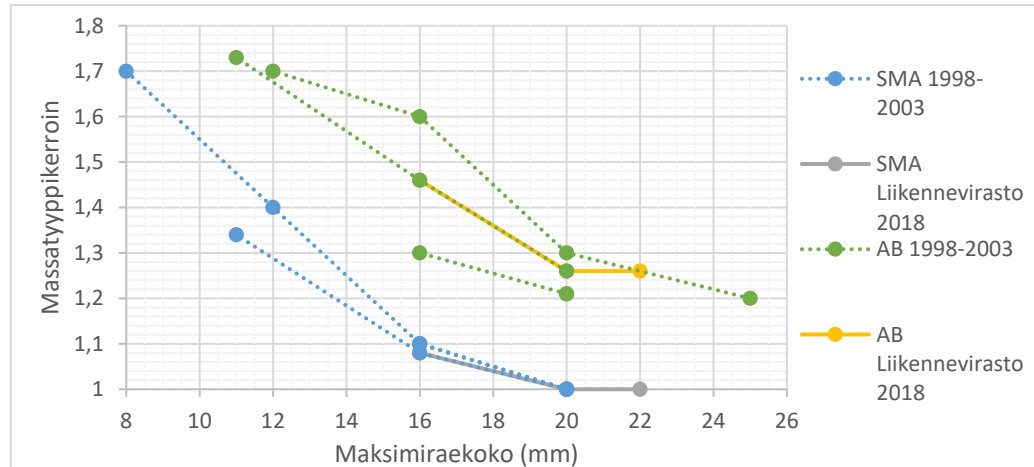




Kuva 42. Kuulamylyarvo suhteessa laskennalliseen kulumisnopeuteen massatyypikertoimella 1,0 (kaavat lähteistä Kurki 1998; Alkio 2001; Liikennevirasto 2018).

Kuvan 42 perusteella laskennallinen kulumisnopeus on pysynyt samana vuoden 1998 jälkeen noin kuulamylyarvolla 8, mutta sitä pienemmillä kuulamylyarvoilla kulumisnopeutta on pienennetty ja suuremmilla suurennettu.

Taulukoissa 18–22 esitettyjen massatyypikertoimien kehitys on koottu kuvaan 43. Kuvasta ilmenee, että SMA-päällysteiden kertoimet ovat pysyneet samankaltaisina, kun taas AB-päällysteiden kertoimia on muutettu enemmän.



Kuva 43. Massatyypikertoimien kehitys laskennallisen kulumisnopeuden arvioinnissa.

Myös Prall- ja SRK-arvojen välille on kehitetty kaavoja. Vuonna 2001 Kurki loi mallin SRK- ja Prall-arvojen välille SMA 16 -massan tuloksiin perustuen. Sen mukaan laskennallinen SRK-arvo saadaan kaavalla (Alkio 2001)

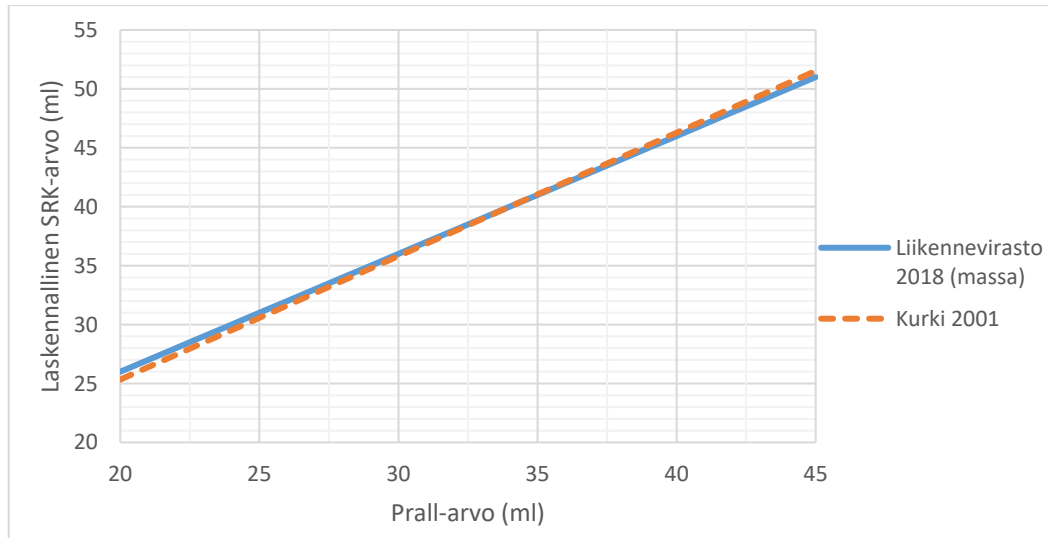
$$\text{Laskennallinen SRK-arvo} = (11 \cdot \text{Prall} + 46) / 10,5. \quad (8)$$

*Tierakenteen suunnittelu* -ohjeessa (2018) on esitetty laskennallinen yhteys Prall-arvon ja kulumisnopeuden välille. Kun asetetaan massatyyppi- ja toimenpidekertoimet arvoihin 1,0, voidaan Prall- ja SRK-arvojen välinen yhteys esittää muodossa

$$Prall_{MASSA} = KN - 6 = \underbrace{TP}_{=1} \cdot \underbrace{MT}_{=1} \cdot \underbrace{(9,4 + 2,21 \cdot KM)}_{= \text{Laskennallinen SRK-arvo}} - 6 =$$

Laskennallinen SRK-arvo - 6. (9)

Kuvassa 44 on esitetty kaavojen 8 ja 9 mukaiset Prall- ja SRK-arvojen suhteet.



Kuva 44. Prall- ja SRK-arvojen laskennallinen yhteys (kaavat lähteistä Alkio 2001; Liikennevirasto 2018).

Kuvasta 44 ilmenee, että edellä esitetyt kaavat 8 ja 9 ovat likimain samat. Nykyinen laskennallisen Prall-arvon kaava siis perustuu vuonna 2001 kehitettyyn malliin.

Kokonaisuudessaan tällä hetkellä Suomessa käytössä olevat laskennallisen kulumisnopeuden ja Prall-arvon kaavat perustuvat siis vuosina 1990–2000 tehtyihin koetie- ja laboratoriomittauksiin sekä niistä johdettuihin kaavoihin. Huomioitavaa on myös, että kaavat pohjautuvat SRK-menetelmään, vaikka sitä ei ole käytetty lähes kahteenkymmeneen vuoteen päällysteen kulumisen arvioinnissa.

Hietalan ja Kuulan (2019) tutkimuksessa havaittiin kuulamylyarvon avulla AB 16:lle saatavan laskennallisen Prall-arvon olevan noin 30–40 % eli 7–10 yksikköä todellista Prall-arvoa suurempi. Tämä viittaisi siihen, että kuulamylyarvon perusteella Prall-vaatimusta asetettaessa saatetaan sallia turhan suuri kuluma-arvo ja Prall-arvon pohjalta massa voidaan valita tarpeettoman luja kivi. Tosin täytyy huomioda, että tutkimuksessa tutkittiin vain yhtä massatyyppiä ja maksimiraekokoa.

Myös muissa Pohjoismaissa on kehitetty nastarengaskulumisnopeutta kuvaavia yksinkertaisia kaavoja. Ruotsissa on kehitetty kulumismalli teknistaloudellisen päätöksenteon tueksi: mallia voidaan käyttää muun muassa vaatimusten asettamisessa, seuraavan toimenpiteen ajankohdan ennustamisessa, nastarengaskulumista arvioitaessa sekä vuosikustannusten laskemisessa. Vuonna 1997

Ruotsin mallista kehitettiin ensimmäinen versio, jota on ajan myötä kalibroitu. Vuonna 2006 malli päivitettiin, ja siihen muun muassa lisättiin mahdollisuus syöttää lähtöarvoksi Prall-arvo. Mallissa kuluman arvioinnissa huomioidaan joko yli 4 mm kiviaineksen osuus massassa, maksimiraekoko ja kuulamylllyarvo tai päällysteen Prall-arvo ja massatyyppi. Mallissa on myös joitain rajoituksia, esimerkiksi kuulamylllyarvon tulee olla 3–13, maksimiraekoon 8–20 mm, yli 4 mm lajitteen osuuden 40–75 % ja Prall-arvon 13–46 ml. Näiden lisäksi mallissa huomioidaan tietyt nopeusrajoitus, liikennemäärä, nastarengaskauden pituus, nastarengaskauden osuus sekä tien mahdollinen suolaus. (Jacobson & Wågberg 2007) Suhteellinen kuluma saadaan kiviaineksen ominaisuuksien perusteella kaavalla (Lundberg et al 2019)

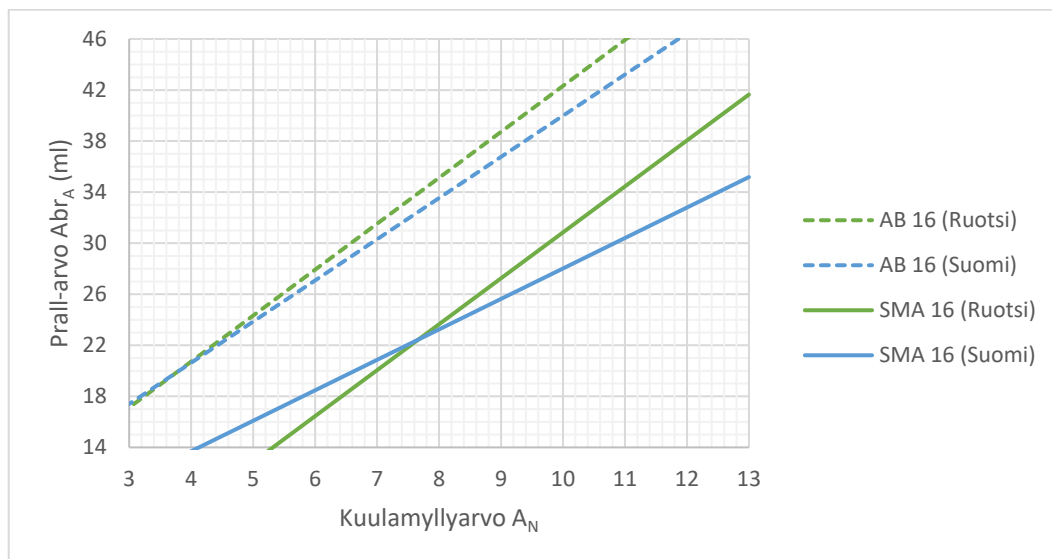
$$\text{Suhteellinen kuluma} = 2,493 + 0,144 \cdot KM - 0,069 \cdot D_{\max} - 0,017 \cdot MAS_4, \quad (10)$$

missä  $KM$  on kuulamylllyarvo,  $D_{\max}$  massan maksimiraekoko ja  $MAS_4$  yli 4 mm lajitteen osuus kiviaineksesta. Suhteellinen kuluma saadaan Prall-arvon perusteella kaavalla (Lundberg et al 2019)

$$\text{Suhteellinen kuluma} = 0,32 + 0,04 \cdot \text{Prall}. \quad (11)$$

Lundberg et al. (2019) tutkivat mallin korrelaatiota tiekulumaan, ja tutkimuksessa mallin havaittiin yliarvioivan kulumaa ja vaativan päivitystä.

Suomen ja Ruotsin kaavoilla saatavia Prall- ja kuulamylllyarvojen yhteyksiä on seuraavassa verrattu AB 16- ja SMA 16 -massoilla. Suomen kaava Prall- ja kuulamylllyarvojen välille on esitetty kaavassa 9. Ruotsin kaava taas saadaan yhdistämällä kaavat 10 ja 11. Suomen kaavaan sijoitetaan SMA 16:n massatyyppikerrotimeksi 1,08 ja AB 16:n 1,46. Ruotsin kaavaan taas sijoitetaan maksimiraekooksi 16 mm ja yli 4 mm:n kiviaineksen osuudeksi SMA 16:lle tyypillinen 75 % ja AB 16:lle tyypillinen 48 %. Kuvassa 45 on esitetty näillä asfalttimassoilla Prall- ja kuulamylllyarvojen yhteyttä kuvaavien kaavojen vertailu maiden välillä.



Kuva 45. Suomen ja Ruotsin Prall- ja kuulamylllyarvojen yhteyttä kuvaavien kaavojen vertailu.

Kuvasta 45 ilmenee, että AB 16 -massalla Suomen ja Ruotsin kaavoilla kuulamylyarvojen perusteella saatavat Prall-arvot ovat lähellä toisiaan. SMA 16 -massalla sen sijaan maiden välillä on enemmän eroa: kaavat vastaavat toisiaan noin kuulamylyarvoilla 7–8, kun taas pienemmillä ja suuremmilla kuulamylyarvoilla maiden välinen ero kasvaa. Kuvasta myös ilmenee, että Ruotsin kaavalla saatavat kuluma-arvot ovat suurempia kuin Suomen kaavalla saatavat arvot kuulamylyarvon ollessa yli 8. Tämä voisi viitata Ruotsin kaavan yliarvioivan kulumaa, kuten Lundberg et al. (2019) havaitsivat. Toisaalta Viman ja Hakim (2010) havaitsivat suomalaisten laboratorioiden määrittämien Prall-arvojen olevan keskimäärin pienempiä kuin ruotsalaisten laboratorioiden. Ruotsin kaava ei vaikuta soveltuvan kovin hyvin suomalaiselle SMA 16 -päällysteelle, jossa Asfalttinnormien (2017) mukaan yli 4 mm kiviaineksen osuuden tulee olla 71–82 % ja kaavassa kyseinen osuus voi olla suurimmillaan 75 %.

Norjassa on 1980–1990 -luvuilla kehitetty päällysteen kulumisen arviointiin NWP-parametri eli *Norwegian wear parameter*. Nykyään parametrin arvo saadaan kaavalla (Uthus 2016)

$$NWP (4 \text{ mm}) = \frac{KM}{>4 \text{ mm kiviaineksen osuus}} \cdot 100, \quad (12)$$

missä *KM* on kiviaineksen kuulamylyarvo. Uthus (2016) havaitsi suuremman korrelaation näytteiden NWP- ja Prall-arvojen välillä kuin kuulamyly- ja Prall-arvojen välillä. Uthusin mukaan tämä viittaa siihen, että Prall-arvoon vaikuttaa kuulamylyarvon lisäksi yli 4 mm kiviaineksen osuus. Tämä voisi myös johtaa siihen, että mikäli asfalttimassan maksimiraekoko on pieni, kuten 11 mm, tulisi käyttää nykyisiä vaatimuksia lujempaa kiveä.

## 5.5 Yhteenveto nastarengaskulumis-kestävyyteen vaikuttavista tekijöistä

Kiviaineksen muodon on todettu vaikuttavan kiviaineksen nastarengaskulutuskestävyyteen. Taulukkoon 23 on koottu eri tutkimusten havainnot kiviaineksen muodon modifioinnin vaikutuksesta kuulamylyarvoon.

*Taulukko 23. Yhteenveto kiviaineksen muodon modifioinnin ja kuulamylyarvon muutoksen välisistä tutkimuksista.*

Tutkimus	Johtopäätös
Vuorinen, 2000	10 yksikön litteysluvun suurentaminen suurensi kuulamylyarvoa 0,1–2,7 yksikköä
Alkio, 2001	10 yksikön litteysluvun suurentaminen suurensi kuulamylyarvoa 0,1–2,1 yksikköä
Hietala & Kuula, 2019	10 yksikön litteysluvun suurentaminen suurensi kuulamylyarvoa 0,5–1,0 yksikköä
Jacobson, 1994	Kubisoinnilla kuulamylyarvo pieneni 1,5–3,0 yksikköä
TTKK, 1998	Litteyslukua modifioimalla kuulamylyarvo suureni jopa 3 yksikköä

Muodon vaihtelun vaikutus kuulamylllyarvoon on erilainen eri kivilajityypeillä (Vuorinen 2000; Alkio 2001; Liikenne- ja viestintäministeriö 2008; Hietala & Kuula 2019). Muutoksen suuruuteen vaikuttavia tekijöitä on havaittu olevan muun muassa kiviaineksen kovuus ja suuntautuneisuus (Hietala & Kuula 2019), kiviaineksen mineralogiassa sitovien kidepintojen määrä pinta-alaa kohti (Liikenne- ja viestintäministeriö 2008) sekä kiviaineksen kiintotiheys (Vuorinen 2000).

Kiviaineksen muodon vaikutusta päällysteen nastarengaskulumiskestävyyteen on tutkittu sekä laboratoriossa Prall-laitteella että minikoetiellä. Alkion (2001) tutkimuksessa kiviaineksen litteysluvun 10 yksikön suurentaminen suurensi Prall-arvoa noin 1,4–4,0 yksikköä, ja Hietalan ja Kuulan (2019) tutkimuksessa vastaava Prall-arvon muutos oli noin 1,9 yksikköä. Vuorisen et al. (1998) tutkimuksessa minikoetiellä kolmen talven nastarengaskuluma suureni noin 0,8–1,1 mm litteysluvun suurentuessa 10 yksikköä.

Kiviaineksen litteysluvun kasvaessa siis sekä kiviaineksen kuulamylllyarvo että päällysteen Prall-arvo ja tiekulumat suurenevät. Litteysluvun muutoksen vaikutus oli kuitenkin erisuuruinen eri parametreihin Alkion (2001) ja Vuorisen et al. (1998) tutkimuksissa. Esimerkiksi kuulamylllyarvo muuttui eniten graniittisilla kiviillä, kun taas Prall-arvoissa muutos oli granodioriitilla pienin ja graniitilla suurin. Minikoetiellä kuluman muutos oli graniittisilla kiviaineksilla muita kiviaineksia pienempi. Myös Göransson et al. (2018) havaitsivat eri parametrien muuttuvan kiviaineksen muodon muuttuessa eri tapaan: tutkimuksessa kubisoinnin myötä koetelaitekuluma pieneni noin 20 %, mutta Prall-arvo suureni noin 3 %. Toisaalta Jacobsonin (1994) tutkimuksessa kubisoinnin vaikutukset kuulamylllyarvoon ja minikoetiekulumaan olivat suhteessa samansuuruisia.

Kiviaineksen ominaisuuksien lisäksi päällysteen tiheyden eli tyhjätilan on todettu vaikuttavan Prall-arvoon. Pellisen ja Makowskan (2015) tutkimuksessa tyhjätilan kasvaessa yhden prosenttiyksikön kasvoi Prall-arvo noin 4 yksikköä. Myös Hietala ja Kuula (2019) havaitsivat Prall-arvon pienenevän näytteen tiheyden kasvaessa. VTT:n vuonna 2006 tekemässä tutkimuksessa taas havaittiin päällysteen tiheyden vaikuttavan Prall-arvoon vain kiviaineksen ollessa lujuudeltaan heikkoa (Laaksonen et al 2008). Vimanin ja Hakimien (2010) laboratorioiden välisessä vertailututkimuksessa Prall-arvon havaittiin pienenevän näytteen tiheyden kasvaessa, mutta välillä ei kuitenkaan ollut vahvaa korrelaatiota. Myöskään Liikenneviraston vuoden 2016 vertailukokeessa Prall-arvon ja näytteiden tyhjätilan välillä ei havaittu vahvaa korrelaatiota, vaikka Prall-arvoissa olikin hajontaa (Bäckström 2017).

Asfalttikiviaineksen hienon kiviaineksen lujuudella ei ole merkittävää vaikutusta päällystenäytteen Prall-arvoon. Robertsenin (2018) tutkimuksen havaintojen mukaan alle 8 mm lajitteen lujuudella ei ole vaikutusta Prall-arvoon, kun taas Siebertin ja Morkin (2016) tutkimuksen havaintojen mukaan alle 4 mm lajitteen lujuudella ei ole vaikutusta Prall-arvoon. Toisaalta aiemmin Suomessa SRK-laitteella tehdyissä tutkimuksissa havaittiin kiviaineksen 0/8 mm lajitteen lujuuden vaikuttavan kulumiskestävyyteen (Kurki et al 1992). Hienon kiviaineksen muodolla ei kuitenkaan havaittu olevan suurta vaikutusta SRK-arvoon (Alkio & Vuorinen 1999).

Pohjoismaissa päällysteen nastarengaskulumisen ennustamiseen on kehitetty yksinkertaisia kaavoja teknistaloudellisen päätöksenteon tueksi. Suomessa käytössä on *Tierakenteen suunnittelu* -ohjeessa (2018) kuvattu laskennallisen kulumisnopeuden kaava, joka on likimääräinen keskiarvo seuraavista kaavoista:

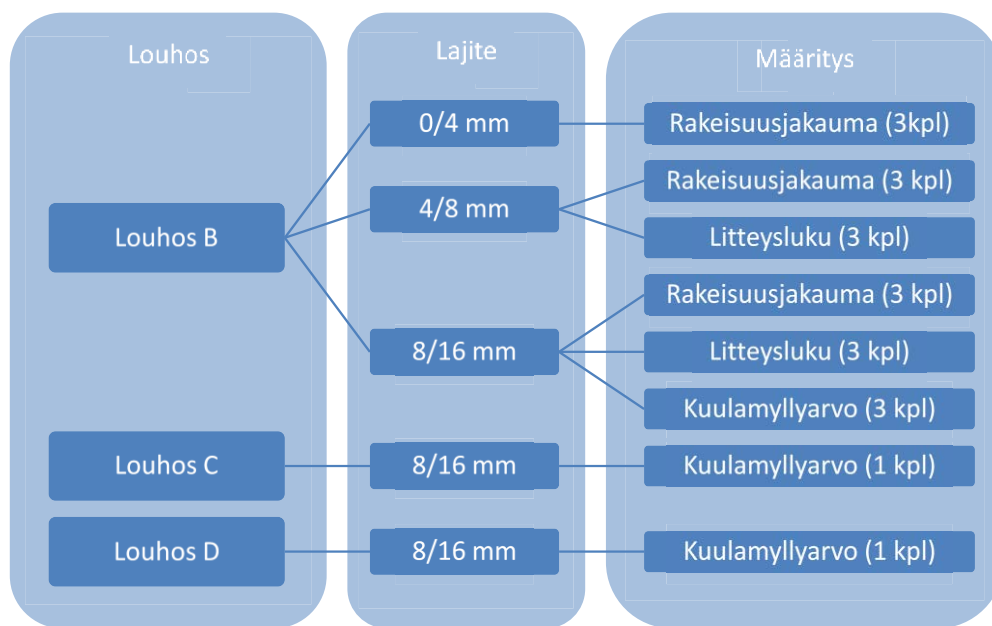
- Kurjen vuonna 1998 tekemä kaava ASTO-koeteiden vuosien 1990–1997 mittausten pohjalta.
- Kurjen vuonna 2001 tekemä kaava Vt 1:n minikoetietutkimusten vuosien 1995–1998 tulosten ja laboratoriotulosten, Vt 3:n vuosien 1999–2000 minikoetien ja ASTO-koeteiden mittausten pohjalta.

Käytössä oleva kulumisnopeuden kaava siis perustuu vuosina 1990–2000 tehtyihin koetie- ja laboratoriomittauksiin, mutta kulumisnopeuden kaavaa on korjattu myöhemmin muokatuilla massatyyppikertoimilla. Myös nykyisin käytössä oleva laskennallisen Prall-arvon kaava perustuu vuoden 2001 tutkimuksessa SRK- ja Prall-arvojen välille havaittuun yhteyteen.

## 6 Kiviainesnäytteet ja -testit

### 6.1 Kiviainesten testausohjelma ja -menetelmät

Tutkimuksessa valmistettiin yhden louhoksen (B) kiviaineksesta asfalttimassaa, johon vaihdettiin 11,2/16 mm lajitteen tilalle louhoksen C ja D kiviainesta. Asfalttimassan suunnittelua varten määritettiin louhoksen B lajitteiden 0/4, 4/8 ja 8/16 mm rakeisuusjakaumat. Lisäksi materiaaliominaisuuksien selvittämistä varten määritettiin louhoksen B lajitteista 4/8 ja 8/16 mm litteysluku sekä lajitteesta 8/16 mm kuulamyllyarvo. Louhoksen C ja D lajitteista 8/16 mm määritettiin vain kuulamyllyarvo. Kuvassa 46 on esitetty kiviainesten testausohjelma.



Kuva 46. Kiviainesten testausohjelma.

Tässä tutkimuksessa on käytetty samoja kiviainestyyppiejä kuin julkaisussa Hietala & Kuula (2019) ja louhokset on nimetty kyseistä julkaisua vastaavasti. Louhoksen B kiviaines on samalta louhokselta ja samaa kiviainestyyppiä kuin Hietalan ja Kuulan kiviaines B, mutta tämän tutkimuksen kiviaines on haettu noin vuotta myöhemmin. Louhoksen C ja D kiviainekset taas ovat täysin samoja ja haettu louhokselta samaan aikaan kuin Hietalan ja Kuulan tutkimuksen kiviainekset C2 ja D1K. Hietalan ja Kuulan tutkimuksessa on tutkittu louhoksen B, C ja D kiviainesten ominaisuuksia ja toimintaa, ja tämän tutkimuksen kannalta oleelliset tulokset on koottu kappaleeseen 6.3.

#### 6.1.1 Pesuseulonta

Kiviainesnäytteiden rakeisuusjakauma määritettiin pesuseulonnalla standardin SFS-EN 933-1 (2012) mukaisesti. Aluksi kiviaineksesta otettiin testinäyte siten, että standardissa esitetyn taulukon mukainen minimimassavaatimus täyttyi: esimerkiksi maksimiraekoolla 16 mm testinäytteen tuli olla vähintään 2,6 kg. Näyte kuivattiin uunissa  $110 \pm 5$  °C lämpötilassa vakiomassaan ja punnittiin. Tämän jälkeen näyte kaadettiin ämpäriin, peitettiin vedellä ja näytettä pestiin

0,063 mm pesuseulalla, kunnes vesi oli kirkasta. Pesty näyte kuivattiin uunissa  $110 \pm 5$  °C lämpötilassa vakiomassaan ja punnittiin. Tämän jälkeen näyte kaadettiin seulasarjaan, jota tärytettiin noin 15 minuutin ajan. Lopuksi seulat tyhjennettiin yksitellen ja niille jääneet kiviainekset punnittiin. Rakeisuusjakauma määritettiin laskemalla kullekin seulalle jäävän kiviaineksen osuus koko näytteen massasta ja osuudet summattiin yhteen läpäisyprosentteiksi.

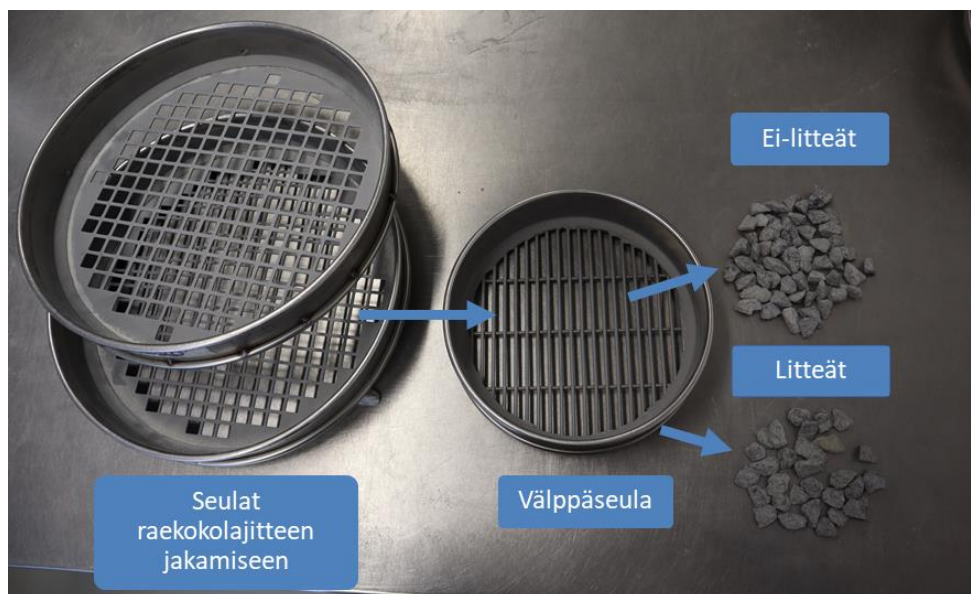
### 6.1.2 Litteysluvun määrittäminen

Kiviainesten litteysluku määritettiin standardin SFS-EN 933-3 (2012) mukaisesti. Aluksi testinäytettä otettiin vähintään standardissa SFS EN 933-1 esitetyn taulukon mukainen massa. Testinäyte kuivattiin  $110 \pm 5$  °C lämpötilassa vakiomassaan ja punnittiin. Näyte seulottiin taulukon 24 mukaisiin raekokolajitteisiin käyttäen 4, 5, 6,3, 8, 10, 12,5 ja 16 mm seuloja.

*Taulukko 24. Tutkimuksen raekokolajitteita vastaavat välppäseulat (muokattu lähteestä SFS-EN 933-3 2012).*

Raekokolajite $d_i/D_i$ (mm)	Välppäseulojen rakokoko (mm)
16/20	$10 \pm 0,2$
12,5/16	$8 \pm 0,2$
10/12,5	$6,3 \pm 0,2$
8/10	$5 \pm 0,2$
6,3/8	$4 \pm 0,15$
5/6,3	$3,15 \pm 0,15$
4/5	$2,5 \pm 0,15$

Tämän jälkeen seulat tyhjennettiin yksitellen ja niille jääneet kiviainekset punnittiin. Raekokolajitteet pidettiin erillään toisistaan. Kunkin raekokolajite välpätettiin taulukon 24 mukaisella välppäseulalla, ja välppäseulojen läpäisseet rakeet punnittiin. (SFS-EN 933-3 2012) Litteät rakeet siis läpäisivät välppäseulan, kun taas ei-litteät rakeet jäivät seulalle. Kuvassa 47 on esitetty litteysluvun määrittämisen vaiheita.



Kuva 47. Litteyslukumäärittämisen vaiheita.



Lopuksi laskettiin yhteen raekokolajitteiden massat ( $M_1$ ) ja välppäseulojen läpisseiden rakeiden massat ( $M_2$ ). Litteysluku määritettiin kaavalla

$$FI = \frac{M_2}{M_1} \cdot 100, \quad (13)$$

ja tulos pyöristettiin kokonaislukuun. (SFS-EN 933-3 2012)

### 6.1.3 Kuulamylytesti

Kuulamylyarvo määritettiin standardin SFS-EN 1097-9 (2014) mukaisesti. Aluksi kiviaines seulottiin 11,2, 14 ja 16 mm seuloilla. Fraktioista 11,2/14 ja 14/16 mm määritettiin kuulamylyarvo, ja lisäksi yli 11,2 mm kiviaineksesta määritettiin kiviaineksen ominaispaino. Fraktiot pestiin 4 mm seulalla ja kuivattiin vakiomassaan  $110 \pm 5$  °C lämpötilassa. Tämän jälkeen määritettiin kiviaineksen ominaispaino punnitsemalla kaksi vähintään 1 kg näytettä sekä vedessä että ilmassa. Ominaispainon avulla laskettiin kuulamylyfraktioiden 11,2/14 ja 14/16 mm massat. Fraktioista koottiin kaksi kuulamylynäytettä, sillä yksi kuulamylyarvon määrittäminen sisältää aina kaksi rinnakkaista kuulamylytestiä.

Kuulamylytestissä yksittäisnäyte,  $7\,000 \pm 10$  g teräskuulia sekä  $2 \pm 0,01$  l vettä kaadettiin kuulamylyrumpuun (SFS-EN 1097-9 2014). Kuvassa 48 on esitetty rumpuun asetettavat yksittäisnäyte, teräskuulat ja vesi sekä kuulamylyrumpu.



Kuva 48. Rumpuun asetettavat yksittäisnäyte, teräskuulat ja vesi sekä kuulamylyrumpu.

Kuulamylyrumpua pyöritettiin 5 400 kierrosta ja tämän jälkeen rummun sisältö kaadettiin ämpäriin, kuulat kerättiin pois ja näyte pestiin 2 mm seulalla. Pesty näyte kuivattiin vakiomassaan  $110 \pm 5$  °C lämpötilassa. Lopuksi näyte punnittiin. Kuulamylyarvo määritettiin kaavalla (SFS-EN 1097-9 2014)

$$A_N = 100 \cdot (M_1 - M_2) / M_1, \quad (14)$$

missä  $M_1$  on kuivatun yksittäisnäytteen massa ennen testiä ja  $M_2$  kuivattujen yli 2 mm rakeiden massa testin jälkeen. Kuvassa 49 on esitetty esimerkkinäyte ennen kuulamylytestiä ja kuulamylytestin jälkeen.



Kuva 49. Esimerkinäyte ennen kuulamylytestiä ja testin jälkeen.

Kuvasta 49 ilmenee, että testissä kuluessaan näytteen kiviainesrakeet siis pyöristyivät ja murskautuivat. Kuulamylyarvo määritettiin standardin SFS-EN 1097-9 (2014) mukaisesti kahden yksittäistestituloksen keskiarvona. Mikäli kahden yksittäistestin tuloksen erotus oli suurempi kuin 10 % niiden keskiarvosta, testattiin kaksi yksittäisnäytettä lisää. Tällöin kuulamylyarvo määritettiin neljän yksittäistestituloksen keskiarvosta. Mikäli kuitenkin tulosten keskihajonta oli suuri, poistettiin poikkeava ääriarvo Dixonin menetelmällä ja laskettiin jäljelle jäävien kolmen tuloksen keskiarvo. (SFS-EN 1097-9 2014)

## 6.2 Näytteenotto ja esikäsittely

Louhokselta B haettiin 4.2.2020 0/8 ja 8/16 mm lajitteita. Lajitteet otettiin pyöräkuormaajan avaamasta varastokasasta lapiolla laatikkoihin. Kuvassa 50 on esitetty pyöräkuormaajan avaama kasa 0/8 mm lajitetta.





Kuva 50. Avattu kasa louhoksen B lajitetta 0/8 mm.

Laboratoriossa lajite 0/8 mm katkaistiin 4 mm seulalla lajitteisiin 0/4 ja 4/8 mm asfalttimassan suhteittamista varten. Lajitteista 0/4 ja 4/8 mm otettiin laboratorioissa kolme näytettä, joista määritettiin rakeisuusjakauma ja lisäksi 4/8 mm lajitteen näytteistä litteysluku. Kuvassa 51 on esitetty lajitteen 0/8 mm katkaiseminen sekä lajitteista 0/4 ja 4/8 mm kerätyt testinäytteet.



Kuva 51. Lajitteen 0/8 mm katkaiseminen 4 mm seulalla ja testinäytteet 0/4 ja 4/8 mm lajitteista.

Louhoksen B lajitetta 8/16 mm otettiin louhokselta samaan aikaan seitsemän laatikollista eli noin 350 kg. Laboratoriossa kiviaines jaettiin uudelleen seitsemään eri laatikkoon mahdollisen lajittumisen tasaamiseksi. Kuvassa 52 on esitetty kiviaineslaatikolliset jakamisen alkaessa. Jaetuista laatikoista otettiin kolme näytettä ämpäreihin, ja kiviainesämpärilliset jaettiin vielä jakolaatikolla neljään eri osaan. Jakolaatikolla jaetuista neljäsosanäytteistä määritettiin rakeisuus ja litteysluku, ja ämpärin loppu kiviaines käytettiin kuulamylytestiin.





Kuva 52. Louhoksen B lajitteen 8/16 mm jakaminen alkamassa.

Louhosten C ja D kiviainesten näytteenotto ja esikäsittely ovat esitetty julkaisussa Hietala & Kuula (2019).

## 6.3 Kiviainestestien tulokset

### 6.3.1 Louhos B

Louhoksen B kiviaines koostuu kolmesta mineralogialtaan erilaisesta osasta: muutamat lähes valkoiset rakeet ovat puhdasta kvartsia, vaaleammat osin vihertävät rakeet ovat kvartsi-maasälpägneisiä ja tummimmat rakeet ovat amfiboliittia. Lajitteet 0/8 ja 8/16 mm olivat käyneet läpi nelivaiheisen murskauksen sisältäen muotoilun keskipakomurskaimella eli kubisoinnin. Kuvassa 53 on esitetty louhoksen B lajitteen 8/16 mm kiviainesrakeita.



Kuva 53. Louhoksen B lajitteen 8/16 mm kiviainesrakeita.

Louhoksen B lajitteelle 8/16 mm määritettiin kolme rinnakkaista kuulamylyarvoa. Näiden tulokset on esitetty taulukossa 25.

Taulukko 25. Louhoksen B kuulamylyarvomäärittysten tulokset.

Näyte	Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3	Näyte 4	Keskiarvo
B1	8,5	9,9	8,8	9,3	9,1
B2	9,0	8,1			8,6
B3	9,3	8,2	8,5	8,3	8,6
Keskiarvo					8,8
Luokka					A <sub>N</sub> 10

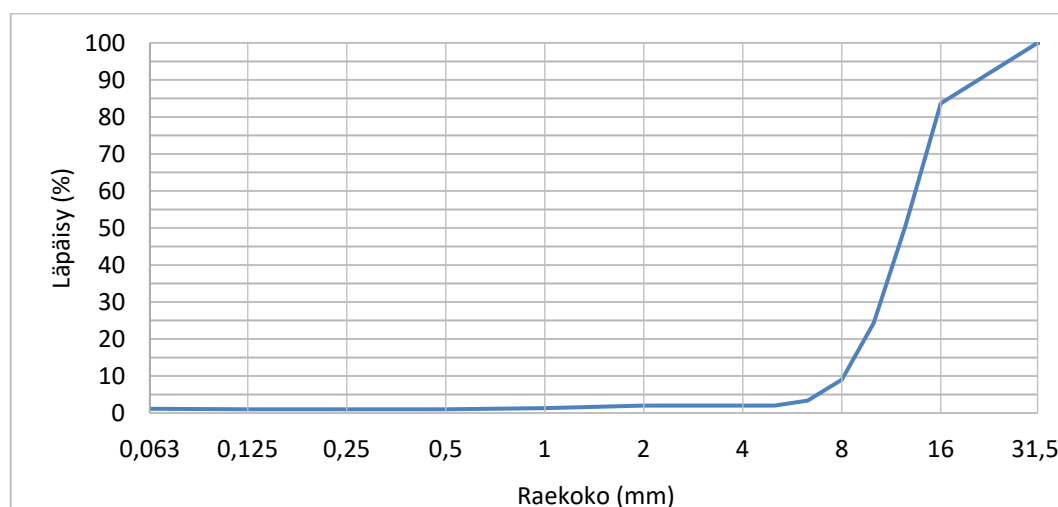
Louhoksen B kolmen kuulamylyarvomäärittysten keskiarvo oli siis 8,8, minkä perusteella kiviaines kuului kuulamylyluokkaan A<sub>N</sub>10. Louhoksen B kiviaineksen kiintotiheydeksi määritettiin kuulamylyarvomäärittysissä keskimäärin 2,73 Mg/m<sup>3</sup>. Louhoksen B kiviaineksen lajitteelle 8/16 mm tehtiin myös kolme rinnakkaista litteyslukumäärittystä. Taulukossa 26 on esitetty nämä litteyslukutulokset.

Taulukko 26. Louhoksen B lajitteen 8/16 mm litteyslukumäärittysten tulokset.

Näyte	Litteysluku
B4	11
B5	13
B6	12
Keskiarvo	12
Luokka	FI <sub>15</sub>

Kolmen määrittysten perusteella litteysluku oli siis keskimäärin 12, minkä perusteella louhoksen B lajite 8/16 mm kuului litteyslukuluokkaan FI<sub>15</sub>.

Louhoksen B lajitteen 8/16 mm kolmelle rinnakkaisnäytteelle tehtiin myös pesuseulonta. Kuvassa 54 on esitetty keskimääräinen rakeisuusjakauma kolmen määrittysten perusteella.



Kuva 54. Louhoksen B lajitteen 8/16 mm rakeisuusjakauman määrittysten keskiarvo.

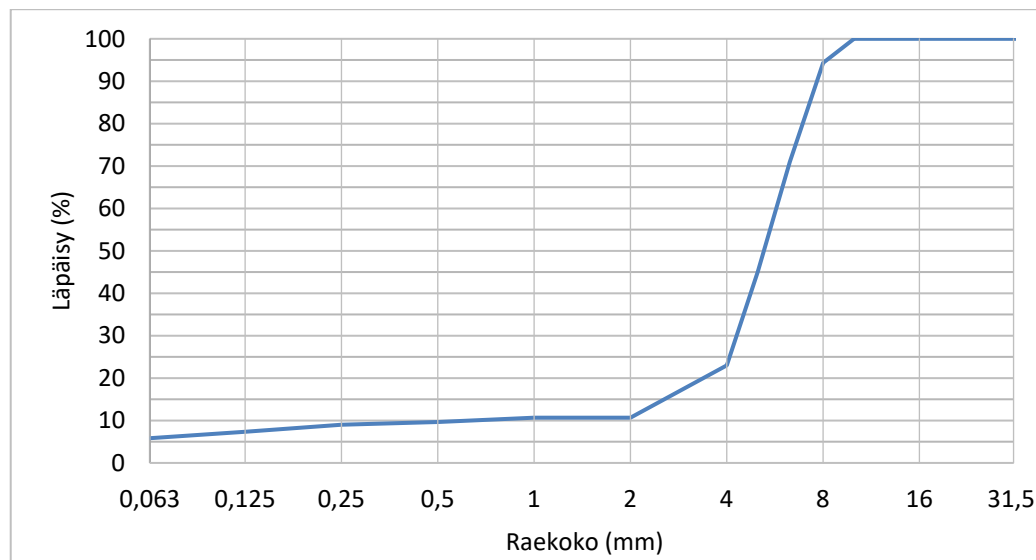
Lisäksi louhoksen B lajitteelle 4/8 mm tehtiin kolme rinnakkaista litteyslukumäärittystä. Taulukossa 27 on esitetty nämä litteyslukutulokset.

Taulukko 27. Louhoksen B lajitteen 4/8 mm litteyslukumäärittysten tulokset.

Näyte	Litteysluku
A7	22
A8	25
A9	23
Keskiarvo	23
Luokka	FI <sub>35</sub>

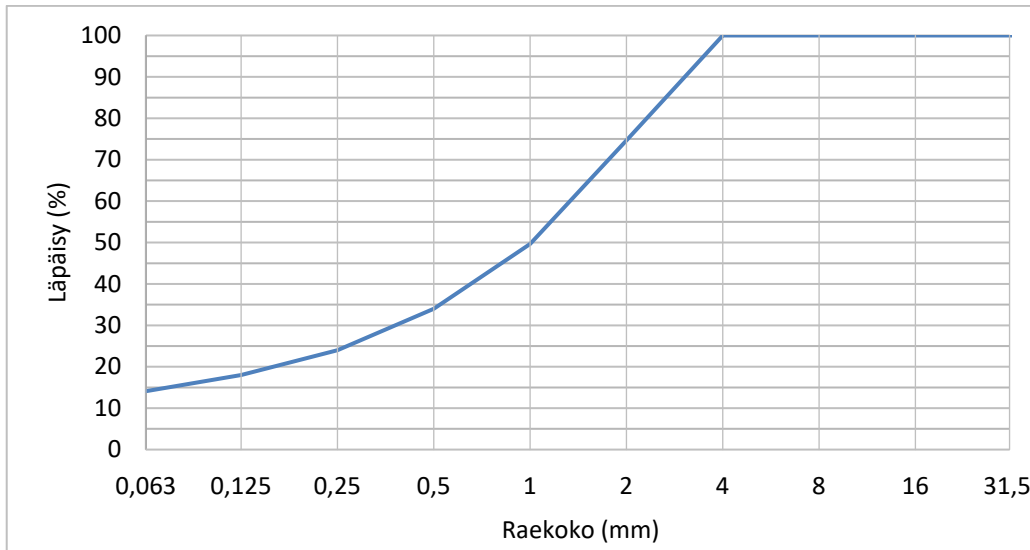
Keskiarvo kolmesta litteyslukumäärittäyksestä oli siis 23, minkä perusteella lajite 4/8 mm kuului litteyslukuokkaan FI<sub>35</sub>.

Myös lajitteen 4/8 mm kolmelle rinnakkaisnäytteelle tehtiin pesuseulonta. Kuvassa 55 on esitetty keskimääräinen rakeisuusjakauma kolmen määrittäksen perusteella.



Kuva 55. Louhoksen B lajitteen 4/8 mm rakeisuusjakauman määrittäysten keskiarvo.

Lisäksi louhoksen B lajitteen 0/4 mm kolmelle rinnakkaisnäytteelle tehtiin pesuseulonta. Kuvassa 56 on esitetty keskimääräinen rakeisuusjakauma kolmen määrittäksen perusteella.



Kuva 56. Louhoksen B lajitteen 0/4 mm rakeisuusjakauman määrittysten keskiarvo.

### 6.3.2 Louhos C

Louhoksen C kiviaines koostui kahdesta kivilajityypistä: granodioriitista ja kiillegneissistä. Graniittista kivilajityypistä kiviaineksessa oli noin 50–70 %. Louhoksen C kiviaines oli käynyt läpi kaksivaiheisen murskauksen, joten sitä ei ollut muotoiltu keskipakomurskaimella eli kubisoitu. Kuvassa 57 on esitetty louhoksen C kiviainesrakeita.



Kuva 57. Louhoksen C kiviainesrakeita.

Tämän tutkimuksen yhteydessä louhoksen C kiviainekselle määritettiin yksi kuulamylyarvo, jonka tulos on esitetty taulukossa 28. Julkaisussa Hietala & Kuula (2019) kyseinen kiviaines on nimetty koodilla C2. Julkaisussa on esitetty kiviainekselle C2 yhden kuulamylyarvomäärityksen tulos sekä kuulamylyarvomääritysten tulokset, kun kuulamylylajitteen litteysluku on modifioitu arvoihin 0 ja 20. Myös nämä tulokset on esitetty taulukossa 28.



Taulukko 28. Louhoksen C kiviaineksen kuulamylyarvomääritysten tulokset.

Tämän tutkimuksen tulokset				
Näyte	Näyte 1	Näyte 2	Keskiarvo	
C	10,9	11,1	11,0	
Julkaisussa Hietala & Kuula (2019) esitetyt tulokset				
Näyte	Näyte 1	Näyte 2	Keskiarvo	Litteysluku
C2	10,5	10,9	10,7	13
C2 (FI 0)	10,3	9,4	9,9	0
C2 (FI 20)	11,4	10,9	11,2	20

Louhoksen C kiviainekselle tässä tutkimuksessa tehdyn kuulamylyarvomäärittelyn tulos oli siis 11, minkä perusteella kiviaines kuului kuulamylyluokkaan A<sub>14</sub>. Louhoksen C kiviaineksen kiintotiheydeksi määritettiin kuulamylymäärittelyn yhteydessä 2,69 Mg/m<sup>3</sup>.

### 6.3.3 Louhos D

Louhoksen D kiviaines oli porfyriittia. Kiviaines oli käynyt läpi nelivaiheisen murskauksen sisältäen kubisoinnin. Kuvassa 58 on esitetty louhoksen D kiviainesarakeita.



Kuva 58. Louhoksen D kiviainesarakeita.

Tämän tutkimuksen yhteydessä louhoksen D kiviainekselle määritettiin yksi kuulamylyarvo, jonka tulos on esitetty taulukossa 29. Julkaisussa Hietala & Kuula (2019) kyseinen kiviaines on nimetty koodilla D1K. Julkaisussa on esitetty louhoksen D kiviainekselle yhden kuulamylyarvomäärittelyn tulos sekä kuulamylymäärittysten tulokset, kun kuulamylylaitteen litteysluku on modifioitu arvoin 0 ja 20. Myös nämä tulokset on esitetty taulukossa 29.



**6.3.3.1 Taulukko 29. Louhoksen D kiviaineksen kuulamylllyarvomäärittysten tulokset.**

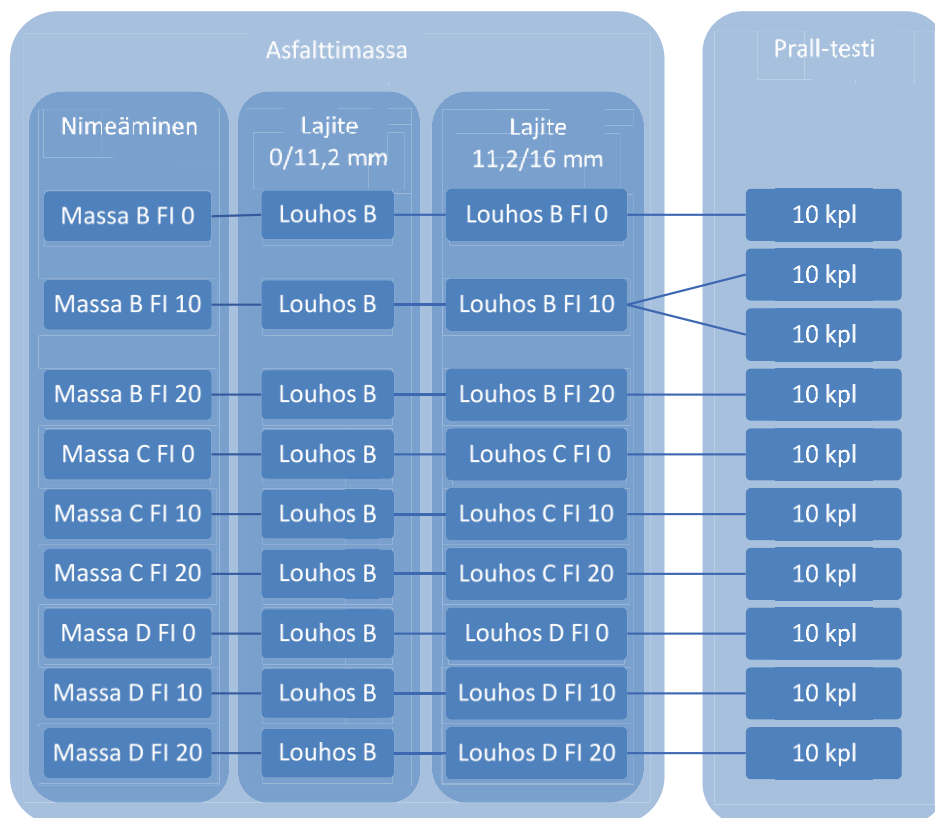
Tämän tutkimuksen tulokset				
Näyte	Näyte 1	Näyte 2	Keskiarvo	
D	5,7	5,9	5,8	
Julkaisussa Hietala & Kuula (2019) esitetyt tulokset				
Näyte	Näyte 1	Näyte 2	Keskiarvo	Litteysluku
D1K	6,0	6,1	6,1	8
D1K (FI 0)	5,7	5,4	6,5	0
D1K (FI 20)	5,8	5,8	5,8	20

Louhoksen D kiviainekselle tässä tutkimuksessa tehdyn kuulamylllyarvomäärittäksen tulos oli siis 5,8, minkä perusteella kiviaines kuului kuulamylllyluokkaan A<sub>N</sub>7. Louhoksen D kiviaineksen kiintotiheydeksi määritettiin kuulamylllyarvomäärittäksen yhteydessä 3,01 Mg/m<sup>3</sup>.

## 7 Asfalttinäytteiden testausohjelma ja -menetelmät

### 7.1 Testausohjelma

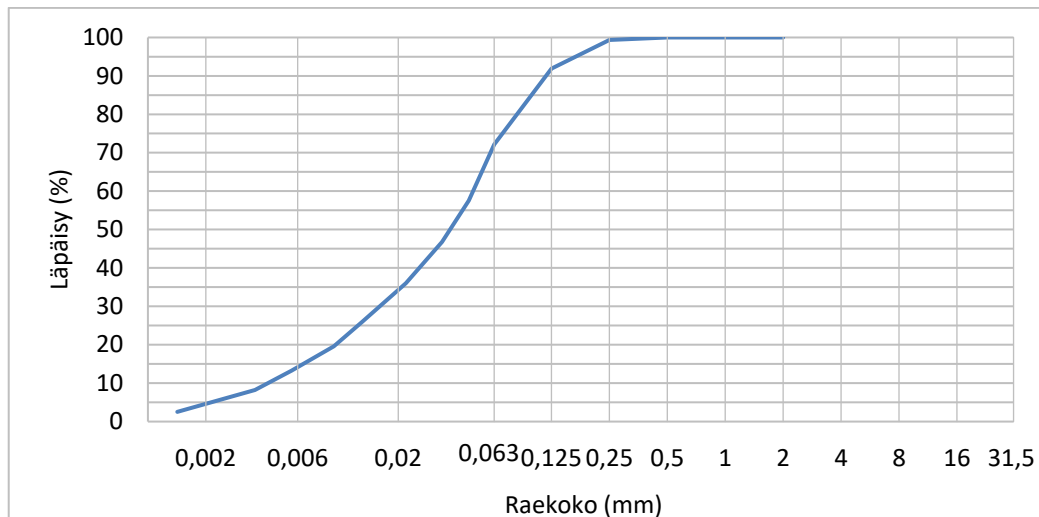
Tutkimuksessa valmistettiin louhoksen B kiviaineksesta SMA 16 -asfalttimassaa, johon 11,2/16 mm lajitteeksi vaihdettiin kolmen louhoksen kiviainesta kolmella eri litteyslukutasolla. Massoista valmistettiin asfalttilaatat, joista kustakin porattiin 10 näytettä Prall-arvon määrittystä varten. Lisäksi louhoksen B litteyslukutason 10 kiviaineksesta valmistetusta massasta tehtiin ylimääräinen asfalttilaatta, jotta saatiin 10 Prall-näytettä laboratorioden väliseen vertailuun. Kuvassa 59 on esitetty asfalttimassojen nimeäminen ja testausohjelma.



Kuva 59. Asfalttimassojen nimeäminen ja testausohjelma.

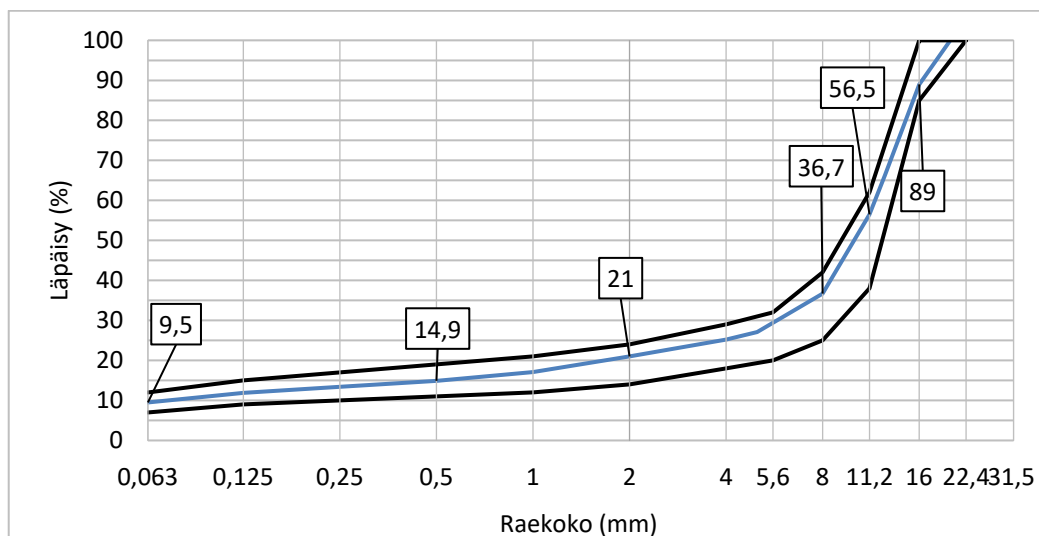
### 7.2 Asfalttimassan suunnittelu

Asfalttimassan suunnittelun lähtökohtana oli Asfalttinormeissa (2017) esitetty rakeisuuden ohjealue SMA 16 -asfalttimassalle. Asfalttimassan valmistuksessa käytettiin Nordkalkin kalkkifilleriä sekä louhoksen B lajitteita 0/4, 4/8 ja 8/11,2 ja 11,2/16 mm. Asfalttimassan suunnittelua varten fillerin rakeisuusjakauma tutkittiin hydrometrikokeella standardin SFS-EN ISO 17892-4 (2016) mukaisesti. Fillerin tutkittu rakeisuusjakauma on esitetty kuvassa 60.



Kuva 60. Kalkkifillerin rakeisuusjakaumamäärityksen tulos.

Louhoksen B lajitteiden 0/4, 4/8 ja 8/16 mm rakeisuusjakaumat on esitetty kapaleessa 6.3.1. Lajite 8/16 mm katkaistiin 11,2 mm seulalla, jolloin saatiin vaihdettua eri massoihin vain 11,2/16 mm lajitetta. Fillerin ja eri lajitteiden rakeisuusjakaumien sekä SMA 16 -massan rakeisuusjakauman ohjealueen perusteella suunniteltiin kuvassa 61 sinisellä esitetty tavoitekäyrä. Kuvassa 61 on myös esitetty Asfalttinormien (2017) mukainen SMA 16 -massan rakeisuusjakauman ohjealue.



Kuva 61. Asfalttinormien (2017) mukainen SMA 16 -massan rakeisuusjakauman ohjealue ja tutkimuksessa suunniteltu tavoitekäyrä.

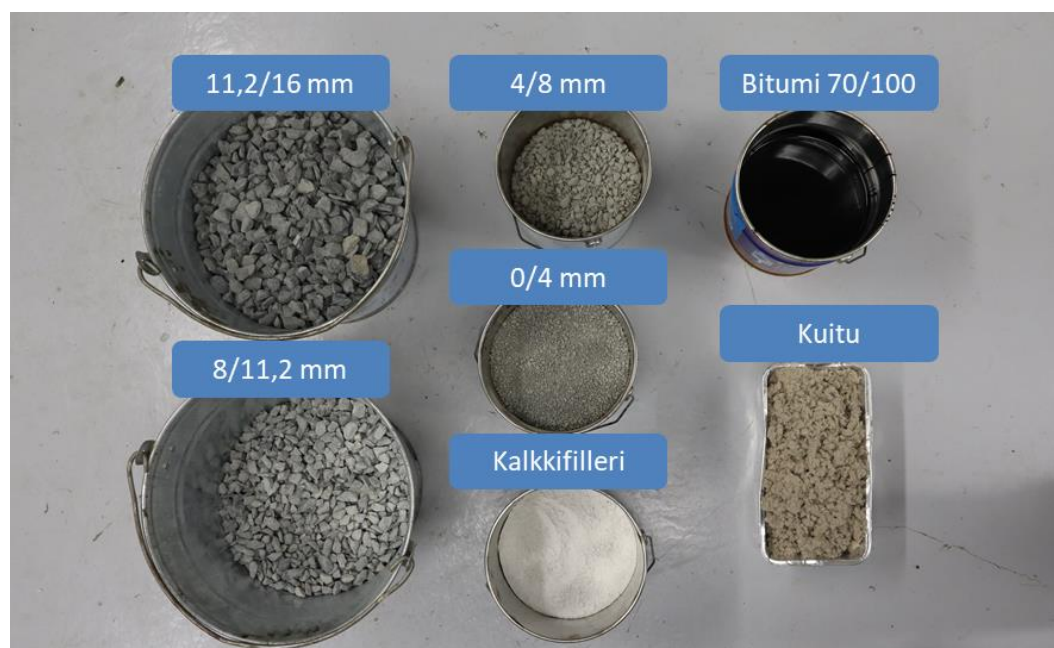
Tavoitekäyrän mukainen koostumus on esitetty taulukossa 30.

Taulukko 30. Asfalttimassalle suunniteltu koostumus.

Materiaali	Osuus (%)
11,2/16 mm	44
8/11,2 mm	25
4/8 mm	9
0/4 mm	13
Kalkkifilleri	9

Asfalttimassan sideaineena tutkimuksessa käytettiin Nynasin tiebitumia 70/100. Asfalttinormien (2017) mukaan SMA 16 -massan sideainepitoisuus tulee olla 5,7–6,7 %, kun kiviaineksen tiheys on 2,65 Mg/m<sup>3</sup>. Tutkimuksessa louhoksen B kiviaineksen tiheys oli 2,73 Mg/m<sup>3</sup>, jolloin ohjesideainepitoisuudeksi määritettiin 5,5–6,5 %. Tutkimuksessa tavoitesideainepitoisuutena oli 6,4 %. Asfalttimassassa käytettiin myös Finnpoolin Arbocel-selluloosakuitua lisäaineena. Kuitu toimii sitovana lisäaineena, ja se mahdollistaa paksummat bitumikalvot (Asfalttinormit 2017). SMA-massaan lisätään tyypillisesti irtokuituna puhdasta selluloosakuitua noin 0,3–0,5 % (Asfalttinormit 2017). Tutkimuksessa asfalttimassaan lisättiin kuitua 0,4 %.

Kuvassa 62 on esitetty asfalttimassan ainesosat reseptin mukaisissa suhteissa.



Kuva 62. Asfalttimassan ainesosat reseptin mukaisissa suhteissa.

Kuvassa 62 esitetyt ainesosat ja niiden määrät pysyivät siis kaikilla asfalttimassoilla muutoin samoina, mutta lajitetta 11,2/16 mm vaihdettiin eri louhosten ja litteyslukutasojen kiviainekseen.

## 7.3 Lajitteen 11,2/16 mm modifiointi

Eri asfalttimassoihin vaihdettiin eri louhosten lajitetta 11,2/16 mm, jossa litteysluku oli modifioitu tasoille 0, 10 ja 20. Aluksi kunkin louhoksen 8/16 mm lajite katkaistiin tarvittaessa 11,2 mm seulalla. Tämän jälkeen 11,2/16 mm lajite jaettiin seuloilla 11,2, 12,5, 16 ja 20 mm. Ylisuuret eli 20 mm seulalle jääneet rakeet poistettiin. Syntyneet lajitteet seulottiin litteyslukumäärityksen mukaisilla välppäseuloilla taulukossa 24 esitetyn mukaisesti: lajite 16/20 mm siis seulottiin 10 mm välppäseulalla, lajite 12,5/16 mm 8 mm välppäseulalla ja lajite 11,2/12,5 mm 6,3 mm välppäseulalla. Kunkin lajitteen välppäseulan läpäisseet litteät rakeet ja välppäseulalle jääneet ei-litteät rakeet eroteltiin.

Tämän jälkeen määritettiin lajitteen 11,2/16 mm massa eri asfalttimassoissa, sillä eri louhosten kiviainesten kiintotiheydet vaihtelivat, mutta asfalttimassan rakeisuuden tavoitekäyrä pidettiin vakiona. Taulukossa 31 on esitetty eri louhosten kiviainesten kiintotiheydet ja määrät suhteessa louhoksen B kiviainekseen.

*Taulukko 31. Lajitteen 11,2/16 mm kiintotiheydet ja määrät eri louhoksilla.*

Louhos	Kiviaineksen kiintotiheys (Mg/m <sup>3</sup> )	Punnittiin louhoksen B kiviaineksen massasta (%)
Louhos B	2,73	100,0
Louhos C	2,69	98,5
Louhos D	3,01	110,3

Louhoksen B kiviainekseen verrattuna louhoksen C kiviainesta punnittiin siis 98,5 % ja louhoksen D 110,3 %.

Tämän jälkeen määritettiin lajitteiden 11,2/12,5, 12,5/16 ja 16/20 mm massat eri asfalttimassoissa. Osuudet määritettiin louhoksen B kiviaineksen rakeisuusjakauman ja asfalttimassan tavoitekäyrän perusteella. Taulukossa 32 on esitetty eri lajitteiden osuudet lajitteen 11,2/16 mm massasta.

*Taulukko 32. Lajitteiden 11,2/12,5, 12,5/16 ja 16/20 mm osuudet lajitteesta 11,2/16 mm.*

Lajite (mm)	Osuus (%)
16/20	25,4
12,5/16	52,4
11,2/12,5	22,2

Seuraavaksi määritettiin lajitteiden 11,2/12,5, 12,5/16 ja 16/20 mm litteiden ja ei-litteiden rakeiden massat asfalttimassan litteyslukutason mukaan. Litteiden ja ei-litteiden rakeiden osuudet määritettiin kaavalla 13. Nämä osuudet eri litteyslukutasoilla on esitetty taulukossa 33.

*Taulukko 33. Litteiden ja ei-litteiden rakeiden osuudet eri litteyslukutasoilla.*

Litteyslukutaso FI 0		Litteyslukutaso FI 10		Litteyslukutaso FI 20	
Litteät	Ei-litteät	Litteät	Ei-litteät	Litteät	Ei-litteät
0 %	100 %	10 %	90 %	20 %	80 %

Eri asfalttimassoja varten punnittiin litteitä ja ei-litteitä rakeita edellä esitetyn määrityksen mukaiset massat asfalttimassan annoskoon perusteella. Esimerkiksi asfalttimassassa B FI 20 lajitteen 11,2/12,5 mm massa oli 2 565 g. Litteysluokituksen ollessa FI 20 punnittiin lajitteen 11,2/12,5 mm litteitä rakeita 20 % eli noin 513 g ja ei-litteitä 80 % eli noin 2 052 g. Kuvassa 63 on esitetty massan B FI 20 lajitteiden 11,2/12,5, 12,5/16 ja 16/20 mm litteät ja ei-litteät rakeet.



Kuva 63. Massan B FI 20 lajitteiden 11,2/12,5, 12,5/16 ja 16/20 mm litteät ja ei-litteät rakeet.

Lopuksi saman asfalttimassan lajitteiden 11,2/12,5, 12,5/16 ja 16/20 mm litteät ja ei-litteät yhdistettiin toisiinsa, jolloin saatiin modifioitu 11,2/16 mm lajite.

## 7.4 Asfalttimassan ja -laatan valmistus

Asfalttimassa valmistettiin laboratoriossa noudattaen soveltuvien osien standardia SFS-EN 12697-35 (2016) *Laboratory mixing* ja käytöstä poistettua PANK-4003-menetelmää (1995a) *Massan valmistus laboratoriossa*. Standardin SFS-EN 12697-35 (2016) mukaisesti aluksi kiviainesfraktiot kuivattiin  $110 \pm 5$  °C lämpötilassa vakiomassaan, minkä jälkeen kiviaines ja filler punnittiin 0,1 %:n tarkkuudella valmistettavan reseptin ja annoksen mukaisesti. Kuitu punnittiin 1 %:n tarkkuudella. Tutkimuksessa asfalttimassan annoskoko oli 28,4 kg louhoksen B kiviaineksella.

Tämän jälkeen kiviaines ja bitumi lämmitettiin massan valmistusta varten. Standardin SFS-EN 12697-35 (2016) mukaan kiviaines ja bitumi tulee lämmittää ennen massan sekoitusta tavoitesekoituslämpötilaan  $\pm 5$  °C. Sekoituslämpötila taas tulee bitumia 70/100 käytettäessä valita niin, että massan lämpötila tiivistyksen alkaessa on 140–150 °C. Sekoituslämpötila ei kuitenkaan saa bitumilla

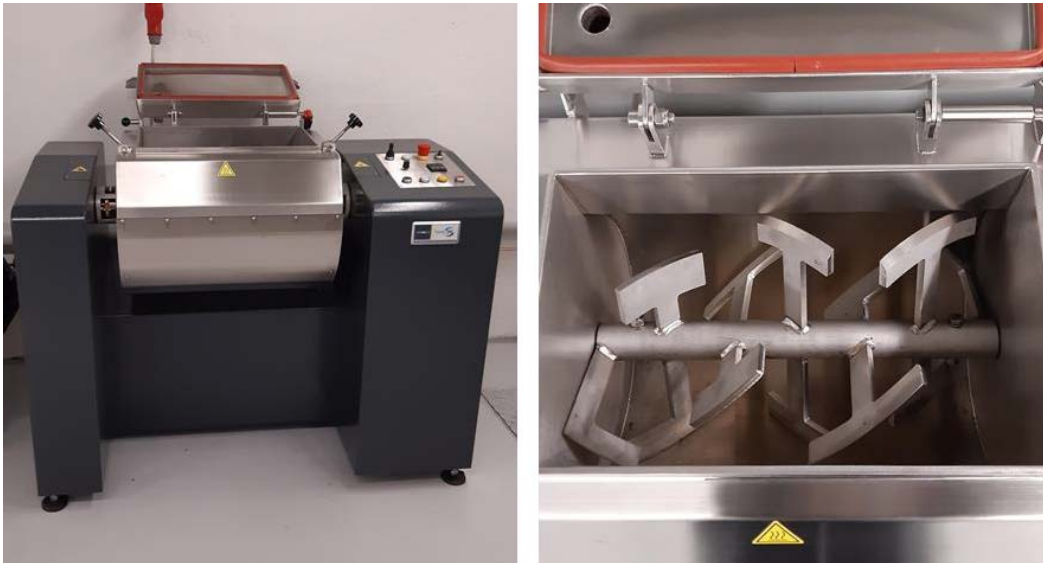


70/100 ylittää lämpötilaa 165 °C. (SFS-EN 12697-35 2016) Tutkimuksessa tavoitesekoituslämpötila oli 165 °C, ja kiviainekset ja filleri lämmitettiin 170 °C lämpötilaan ja bitumi 160 °C lämpötilaan. Standardin SFS-EN 12697-35 (2016) mukaisesti bitumin lämmitys tehtiin 3–5 tunnin aikana. Irtokuitua ei lämmitetty PANK-4003-menetelmän (1995a) mukaisesti. Kuvassa 64 on esitetty eri materiaalien lämpötilat ennen sekoituksen aloittamista.



Kuva 64. Materiaalien lämpötilat ennen sekoituksen aloittamista.

Standardin SFS-EN 12697-35 (2016) mukaan sekoittimen rumpu tulee lämmittää  $\pm 5$  °C tavoitesekoituslämpötilasta. Tutkimuksessa käytössä olleen sekoittimen rummun havaittiin jäähtyvän nopeasti materiaalien lisäämisen yhteydessä luukun ollessa auki, joten sekoitin esilämmitettiin 180 °C lämpötilaan ja bitumin lisäämisen jälkeen lämpötilaksi säädettiin tavoitesekoituslämpötila 165 °C. Tutkimuksessa asfalttimassan valmistuksessa käytettiin automaattista laboratoriosekoitinta Controls 76-B0077/B. Sekoitin on esitetty kuvassa 65.



Kuva 65. Tutkimuksessa käytetty sekoitin ja sen rumpu.

Standardin SFS-EN 12697-35 (2016) mukaan massaa valmistettaessa ensin voidaan esimerkiksi sekoittaa rummussa toisiinsa kiviainesfraktiot ja filleri, joiden jälkeen voidaan lisätä sideaine ja lisäaineet. Lisäaineet sekoitetaan massaan valmistajan ohjeiden mukaisesti simuloiden todellista sekoitusprosessia. (SFS-EN 12697-35 2016) Kuidun valmistajan Finnpoolin mukaan kuitu lisätään kiviainesten jälkeen sekoittimeen, sekoitetaan noin 5–10 sekuntia ja tämän jälkeen lisätään sideaine (Finnpool). Tässä tutkimuksessa sekoittimeen lisättiin aluksi kiviainekset ja filleri, joita sekoitettiin noin 30 sekuntia. Seuraavaksi lisättiin kuitu ja sekoitettiin noin 15 sekuntia.

Tämän jälkeen bitumi lisättiin sekoittimeen luukusta levittäen sitä tasaisesti sekoittimen pyöriessä. Standardin SFS-EN 12697-35 (2016) mukaisesti sideaine punnittiin  $\pm 1$  %:n tarkkuudella lisäämisen yhteydessä. Taulukossa 34 on esitetty eri massoille toteutuneet sideainepitoisuudet.

*Taulukko 34. Massojen toteutuneet sideainepitoisuudet.*

Massa	Toteutunut sideainepitoisuus (%)
Massa B FI 0	6,3
Massa B FI 10	6,4
Massa B FI 20	6,4
Massa C FI 0	6,4
Massa C FI 10	6,4
Massa C FI 20	6,4
Massa D FI 0	6,5
Massa D FI 10	6,4
Massa D FI 20	6,5

Sideainetta eri massoihin lisättiin siis 6,3–6,5 % ja keskimäärin 6,4 %.

Tämän jälkeen massaa sekoitettiin, kunnes seos oli silmämääräisesti homogeeninen ja kiviaines peittynyt kokonaan bitumilla. Standardin SFS-EN 12697-35 (2016) mukaan SMA-massalle maksimisekoitusaika on 4 minuuttia, kun massa ei sisällä modifioitua bitumia tai asfalttirouhetta. Tutkimuksessa massaa sekoitettiin bitumin lisäyksen aikana ja sen jälkeen yhteensä 3 minuuttia. Ensimmäiset kaksi minuuttia sekoittimen kierrosnopeus oli 15–20 kierrosta minuutissa, ja viimeinen minuutti sekoitettiin laitteen maksiminopeudella eli 35 kierrosta minuutissa. Kuvassa 66 on esitetty materiaalien lisäysjärjestys ja sekoitusajat.



*Kuva 66. Materiaalien lisäysjärjestys ja sekoitusajat.*

Sekoitusaika oli siis yhteensä 3 minuuttia ja 45 sekuntia.

Kustakin asfalttimassasta valmistettiin asfalttilaatta muottivanerista tehtyyn laatikkoon, jonka sivumitat olivat noin 41 cm ja 47 cm. Asfalttilaatan paksuudeksi tuli noin 6–7 cm. Massa kaadettiin suoraan sekoittimesta laatikkoon, minkä jälkeen se tiivistettiin. Tiivistyksen aluksi laatikossa oleva massa ylitettiin 8 kertaa jyrällä ilman täryä ja tämän jälkeen täryllä yhteensä 14–20 kertaa massan oletetun tiivistymisen mukaan. Litteyslukutason FI 20 massat oletettiin heikoimmin tiivistyviksi. Aiemman kokemuksen perusteella tutkimuksessa käytössä olleen jyrän lopputulos oli hieman toispuoleinen, joten jyräysuuntaa vaihdettiin täryjyräyksen puolivälissä. Kunkin laatan toteutuneet jyräysmäärät on esitetty taulukossa 35.



Taulukko 35. Eri massojen toteutuneet jyräysmäärät.

Massa	Ylitysmäärät ilman täryä	Ylitysmäärät täryllä
Massa B FI 0	8	6+6
Massa B FI 10	8	8+8
Massa B FI 20	8	8+10
Massa C FI 0	8	8+8
Massa C FI 10	8	8+8
Massa C FI 20	8	8+10
Massa D FI 0	8	8+8
Massa D FI 10	8	8+8
Massa D FI 20	8	8+10

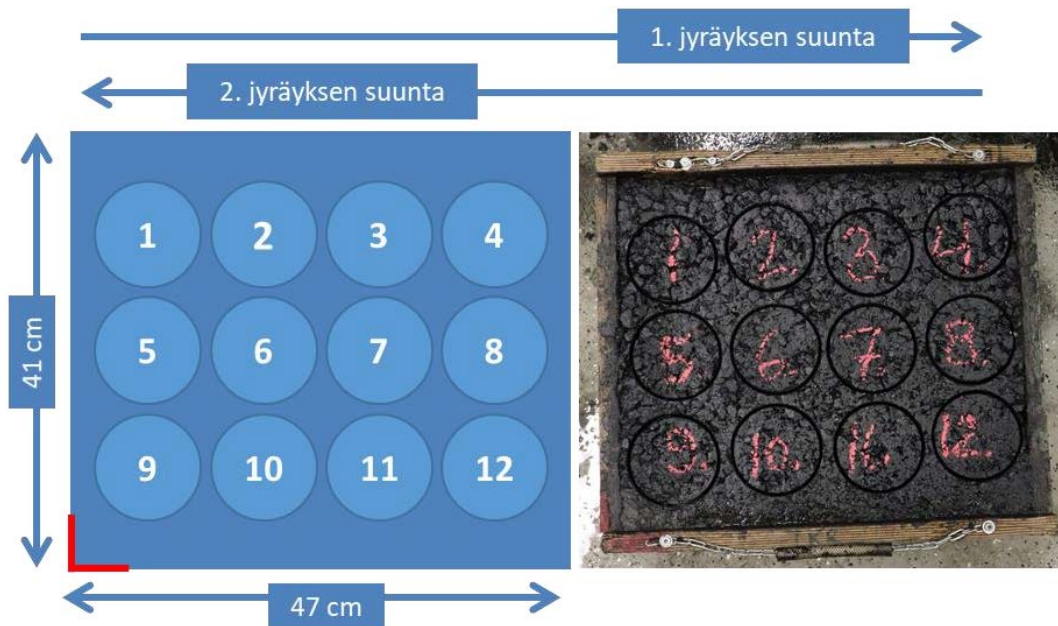
Kuvassa 67 on esitetty asfalttilaatta jyräyksen jälkeen.



Kuva 67. Jyrätty asfalttilaatta.

Standardin SFS-EN 12697-35 (2016) mukaan bitumista 70/100 valmistetun massan lämpötila tiivistyksen alkaessa tulisi olla 140–150 °C. PANK ry:n (2013) mukaan asfalttimassan tiivistymisen takaamiseksi bitumia 70/100 käytettäessä tulisi kolme ensimmäistä tiivistystä tehdä lämpötilan ollessa yli 115 °C ja tiivistysjyräyksen olla suoritettuna kokonaan lämpötilan ollessa yli 75 °C. Tutkimuksessa laatan pinnasta mitatut lämpötilat olivat jyräyksen alkaessa tyypillisesti 130–145 °C ja jyräyksen päättyessä 90–100 °C.

Tiivistyksen jälkeen asfalttilaatan annettiin jäähtyä vähintään yön yli huoneenlämmössä. Tämän jälkeen laatasta porattiin 12 porakappaletta porauskaavion mukaisesti ja kappaleet numeroitiin. Kuvassa 68 on esitetty porauskaavio ja kappaleiden numerointi.



Kuva 68. Porauskaavio ja kappaleiden numerointi.

Lopuksi määritettiin porakappaleiden ympärille jäävistä laatan osista massojen B, C ja D maksimitiheydet standardin SFS-EN 12697-5 (2019) menetelmän B mukaan.

## 7.5 Prall-menetelmä

Prall-arvo tutkittiin standardissa SFS-EN 12697-16 (2016) esitetyn menetelmän A mukaisesti. Standardissa testinäytteiden halkaisijaksi on määritetty 100 (+2 mm), mutta standardista poiketen tutkimuksessa näytteiden halkaisija oli noin 99 mm. Näytteet sahattiin 30 (+2) mm paksuisiksi niin, että päätypintojen korkeusero oli korkeintaan 2 mm. Kuvassa 69 on esitetty esimerkki tutkimuksen porakappaleista ja niistä sahatuista näytteistä.



Kuva 69. Porakappaleet ja sahatut näytteet.

Prall-näytteiden tiheys määritettiin standardin SFS-EN 12697-6 (2012) mukaisesti. SMA-massasta valmistettujen näytteiden tiheys määritetään tyypillisesti standardin menettelyllä B eli kyllästetty pintakuiva -menettelyllä. Menetelmässä aluksi määritettiin kuivan näytteen massa ( $m_1$ ). Tämän jälkeen näyte upotettiin vesihauteeseen 0,5–3 tunnin ajaksi ja määritettiin veden tiheys testauslämpötilassa ( $\rho_w$ ). Kun näytteen massa ei enää muuttunut, määritettiin näytteen massa kyllästettynä veteen upotettuna ( $m_2$ ). Tämän jälkeen näyte otettiin vedestä, sen pinta kuivattiin kostealla säämiskällä ja välittömästi kuivauksen jälkeen näytteen määritettiin massa ilmassa ( $m_3$ ). Näytteen kappaletiheys määritettiin kaavalla (SFS-EN 12697-6 2012)

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \cdot \rho_w. \quad (15)$$

Näytteiden tyhjätilat määritettiin näytteen kappaletiheyden ja massan maksimi-  
tiheyden perusteella. Kunkin massan 12 näytteestä valittiin 10 näytettä Prall-  
testiin niin, että eri massojen 10 näytteen tyhjätilat olivat mahdollisimman sa-  
mankaltaiset. Prall-näytteet kuvattiin ennen Prall-testiä.

Standardin SFS-EN 12697-16 (2016) mukaisesti Prall-näytteitä vakioitiin 5–72  
tuntia vedessä lämpötilassa 5 (+1) °C. Vakioinnin jälkeen näyte nostettiin ve-  
destä, kuivattiin kostealla säämiskällä ja punnittiin välittömästi ( $M_1$ ). Laborato-  
riossa valmistettu näyte asetettiin Prall-laitteen näytekaulukseen sahattu pinta  
ylöspäin. Näytteen päälle asetettiin sileä kumirengas ja 40 teräskuulaa sekä  
näytekauluksen päälle kiinnitettiin kansi. (SFS-EN 12697-16 2016) Testissä testi-  
kammio liikkui kiertokangen liikkeen myötä pystysuunnassa, jolloin kannen alla  
näytteen päällä olevat kuulat kuluttivat kappaletta. Tutkimuksessa oli käytössä  
kappaleessa 4.3 esitelty modifioitu Prall<sub>s</sub>-laite. Kuvassa 70 on esitetty näyte, ku-  
mirengas ja kuulat Prall-laitteessa.

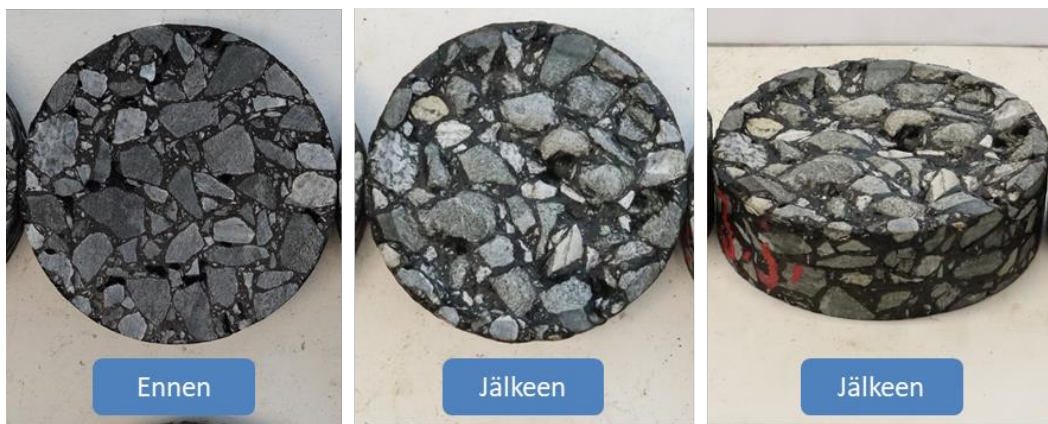


Kuva 70. Näyte asetettuna Prall-laitteeseen.

Laite laitettiin päälle 15 minuutiksi (+10 sekunniksi) nopeudelle 950 (+10) kierrosta minuutissa. Testin aikana näyte pidettiin 5 (+1) °C lämpötilassa jäähdytysvedellä, jonka virtaus oli 2,0 (+0,2) l/min. Testin jälkeen näyte poistettiin laitteesta, huuhdeltiin kylmällä vedellä ja kuivattiin kostealla säämiskällä sekä punnittiin ( $M_2$ ). Näytteen poistamisen yhteydessä näytteestä mahdollisesti irtoavat kivet huomioitiin näytteen massassa. Prall-arvo määritettiin kaavalla (SFS-EN 12697-16 2016)

$$Abr_A = (M_1 - M_2) / \rho_{bssd} \quad (16)$$

Näytteet kuvattiin testin jälkeen kohtisuoraan ja viistosti kulutuspintaan nähdessä. Kuvassa 71 on esitetty esimerkki näytteestä ja sen kuvaamisesta ennen Prall-testiä ja testin jälkeen.



Kuva 71. Näyte ennen Prall-testiä ja testin jälkeen.

Kuvasta 71 ilmenee, että testissä kuulat siis kuluttivat Prall-näytettä pyöreältä pinnalta näytteen päälle asetetun kumirenkaan sisäpuolelta.



## 8 Tulokset

### 8.1 Massa B

Massasta B valmistettujen näytteiden Prall-tulokset eri litteyslukutasoilla on esitetty taulukossa 36.

*Taulukko 36. Massan B Prall-tulokset eri litteyslukutasoilla.*

Näyte	FI 0	FI 10	FI 20
a	20,8 ml	26,1 ml	21,4 ml
b	20,9 ml	21,2 ml	22,6 ml
c	18,4 ml	26,0 ml	23,1 ml
d	23,1 ml	17,5 ml	27,2 ml
e	23,5 ml	19,6 ml	22,5 ml
f	19,6 ml	23,2 ml	28,1 ml
g	18,6 ml	20,2 ml	25,3 ml
h	25,8 ml	22,8 ml	20,8 ml
i	19,7 ml	23,7 ml	24,0 ml
j	25,4 ml	21,2 ml	22,0 ml
<b>Keskiarvo</b>	<b>21,6 ml</b>	<b>22,2 ml</b>	<b>23,7 ml</b>
<b>Keskihajonta</b>	<b>2,7 ml</b>	<b>2,8 ml</b>	<b>2,5 ml</b>
<b>Asfalttinormien Prall-luokka</b>	<b>Abr<sub>Amax</sub>28</b>	<b>Abr<sub>Amax</sub>28</b>	<b>Abr<sub>Amax</sub>28</b>

Massasta B valmistetut näytteet kuuluivat Prall-tulosten keskiarvon perusteella Asfalttinormien (2017) luokkaan Abr<sub>Amax</sub>28. FI 0 -näytteiden Prall-tulosten keskiarvo oli 21,6 ml, FI 10 -näytteiden 22,2 ml ja FI 20 -näytteiden 23,7 ml. Keskihajonnat eri litteyslukutasoilla olivat välillä 2,5–2,8 ml.

### 8.2 Massa C

Massasta C valmistettujen näytteiden Prall-tulokset eri litteyslukutasoilla on esitetty taulukossa 37.

Taulukko 37. Massan C Prall-tulokset eri litteyslukutasoilla.

Näyte	FI 0	FI 10	FI 20
a	27,2 ml	27,2 ml	21,5 ml
b	27,7 ml	28,2 ml	25,8 ml
c	31,1 ml	22,3 ml	29,5 ml
d	21,5 ml	27,4 ml	27,2 ml
e	28,3 ml	31,2 ml	25,9 ml
f	27,1 ml	25,9 ml	26,7 ml
g	31,2 ml	26,3 ml	28,4 ml
h	22,0 ml	24,9 ml	29,0 ml
i	30,2 ml	32,5 ml	23,0 ml
j	27,4 ml	29,4 ml	23,9 ml
<b>Keskiarvo</b>	<b>27,4 ml</b>	<b>27,5 ml</b>	<b>26,1 ml</b>
<b>Keskihajonta</b>	<b>3,4 ml</b>	<b>3,0 ml</b>	<b>2,6 ml</b>
<b>Asfalttinormien Prall-luokka</b>	<b>Abr<sub>Amax</sub>28</b>	<b>Abr<sub>Amax</sub>28</b>	<b>Abr<sub>Amax</sub>28</b>

Massasta C valmistetut näytteet kuuluivat Prall-tulosten keskiarvon perusteella Asfalttinormien (2017) luokkaan Abr<sub>Amax</sub>28. FI 0 -näytteiden Prall-arvojen keskiarvo oli 27,4 ml, FI 10 -näytteiden 27,5 ml ja FI 20 -näytteiden 26,1 ml. Keskihajonnat olivat välillä 2,6–3,4 ml eri litteyslukutasoilla.

## 8.3 Massa D

Massasta D valmistettujen näytteiden Prall-tulokset eri litteyslukutasoilla on esitetty taulukossa 38.

Taulukko 38. Massan D Prall-tulokset eri litteyslukutasoilla.

Näyte	FI 0	FI 10	FI 20
a	20,0 ml	19,9 ml	19,0 ml
b	17,5 ml	21,4 ml	21,3 ml
c	15,3 ml	16,8 ml	18,7 ml
d	23,2 ml	21,7 ml	19,2 ml
e	17,7 ml	14,3 ml	19,9 ml
f	22,6 ml	19,7 ml	20,5 ml
g	18,5 ml	22,1 ml	22,8 ml
h	20,9 ml	16,4 ml	21,0 ml
i	19,5 ml	19,3 ml	22,6 ml
j	19,6 ml	20,2 ml	20,7 ml
<b>Keskiarvo</b>	<b>19,5 ml</b>	<b>19,2 ml</b>	<b>20,6 ml</b>
<b>Keskihajonta</b>	<b>2,4 ml</b>	<b>2,6 ml</b>	<b>1,4 ml</b>
<b>Asfalttinormien Prall-luokka</b>	<b>Abr<sub>Amax</sub>20</b>	<b>Abr<sub>Amax</sub>20</b>	<b>Abr<sub>Amax</sub>28</b>

Massasta D valmistetut näytteet kuuluivat keskiarvon perusteella Asfalttinormien (2017) luokkiin Abr<sub>Amax</sub>20 ja Abr<sub>Amax</sub>28. FI 0 -näytteiden Prall-arvojen keskiarvo oli 19,5 ml, FI 10 -näytteiden 19,2 ml ja FI 20 -näytteiden 20,6 ml. Keskihajonnat olivat välillä 1,4–2,6 ml eri litteyslukutasoilla.

## 8.4 Vertailulaboratoriot

Prall-näytteitä testattiin myös kahdessa muussa laboratoriossa. Laboratorioissa A ja B oli Tampereen yliopiston tapaan modifioidut Prall<sub>s</sub>-laitteet. Massan B litteyslukutason 10 näytteiden Prall-tulokset vertailulaboratorioissa on esitetty taulukossa 39.

Taulukko 39. Massan B FI 10 vertailulaboratorioiden Prall-tulokset.

Näyte	Laboratorio A	Laboratorio B
a	14,7 ml	19,3 ml
b	15,1 ml	18,8 ml
c	15,3 ml	18,4 ml
d	13,9 ml	20,1 ml
e	19,7 ml	18,6 ml
Keskiarvo	15,7 ml	19,0 ml
Keskihajonta	2,3 ml	0,7 ml
Asfalttinormien Prall-luokka	Abr <sub>Amax</sub> 20	Abr <sub>Amax</sub> 20

Laboratoriolla A Prall-tulosten keskiarvo oli siis 15,7 ml ja laboratoriolla B 19,0 ml. Keskiarvon perusteella näytteet kuuluivat molemmissa laboratoriossa Asfalttinormien (2017) luokkaan Abr<sub>Amax</sub>20. Keskihajonta laboratoriolla A oli 2,3 ml ja laboratoriolla B 0,7 ml.

## 8.5 Tulosten yhteenveto

Taulukkoon 40 on koottu tulosten keskiarvot eri louhoksilta ja laboratorioista.

Taulukko 40. Yhteenveto Prall-tulosten keskiarvoista.

Massa	FI 0	FI 10	FI 20
Massa B	21,6 ml	22,2 ml	23,7 ml
		15,7 ml (laboratorio A)	
		19,0 ml (laboratorio B)	
Massa C	27,4 ml	27,5 ml	26,1 ml
Massa D	19,5 ml	19,2 ml	20,6 ml

Liitteessä A on esitetty valokuvat kaikista näytteistä ennen Prall-testiä ja sen jälkeen.

## 9 Tulosten analysointi ja vertailu

### 9.1 Tulosten hajonta ja Prall-menetelmän toistettavuus

Tarkastellaan ensin rinnakkaisten Prall-tulosten hajontaa ja Prall-menetelmän toistettavuutta. Kuten kirjallisuusselvityksessä ilmeni, Prall-menetelmän toistettavuudessa on havaittu olevan haasteita. Toistettavuus määritetään kaavalla

$$r = \sqrt{s_r^2} \cdot 2,8, \quad (17)$$

missä  $s_r$  on toistettavuusvarianssi (Kinnunen 2019). Toistettavuusvarianssi vastaa yhden laboratorion tuloksia tarkasteltaessa varianssia, jolloin toistettavuusvarianssi voidaan määrittää keskihajonnan ( $s$ ) avulla kaavalla

$$r = s \cdot 2,8. \quad (18)$$

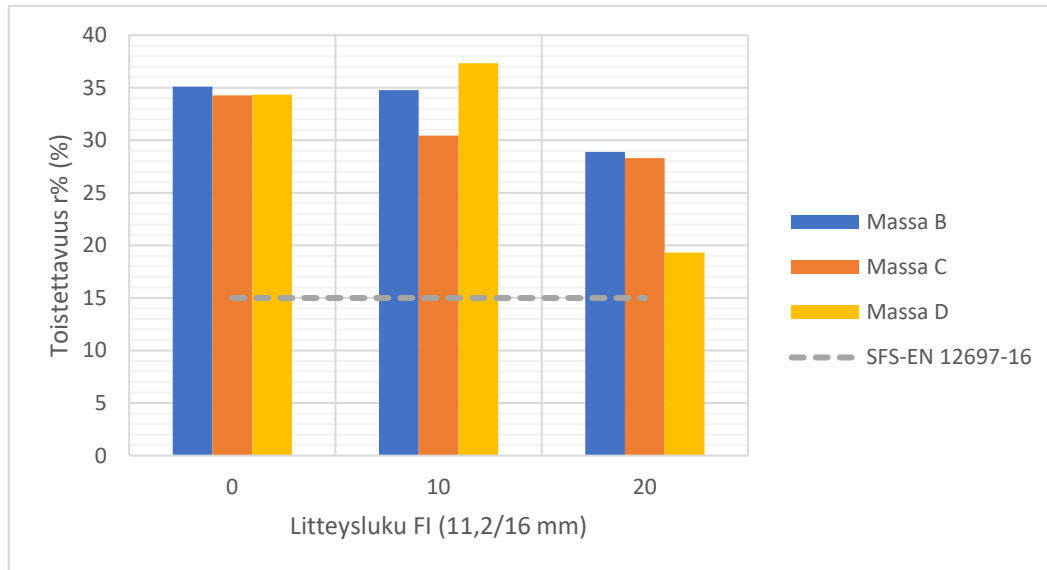
Taulukkoon 41 on koottu kunkin massan 10 yksittäistuloksen Prall-keskiarvo, keskihajonta sekä massakohtaisesti kaavalla 18 määritetty toistettavuus.

*Taulukko 41. Massojen Prall-tulosten keskihajonnat ja toistettavuudet.*

Massa	Prall-keskiarvo (10 kpl)	Keskihajonta $s$	Toistettavuus $r$	Toistettavuus $r\%$
Massa B FI 0	21,6 ml	2,7 ml	7,6 ml	35,1 %
Massa B FI 10	22,2 ml	2,8 ml	7,7 ml	34,8 %
Massa B FI 20	23,7 ml	2,5 ml	6,8 ml	28,9 %
Massa C FI 0	27,4 ml	3,4 ml	9,4 ml	34,3 %
Massa C FI 10	27,5 ml	3,0 ml	8,4 ml	30,5 %
Massa C FI 20	26,1 ml	2,6 ml	7,4 ml	28,3 %
Massa D FI 0	19,5 ml	2,4 ml	6,7 ml	34,3 %
Massa D FI 10	19,2 ml	2,6 ml	7,2 ml	37,3 %
Massa D FI 20	20,6 ml	1,4 ml	4,0 ml	19,3 %
<b>Keskiarvo</b>	<b>2,6 ml</b>	<b>7,2 ml</b>	<b>31,4 %</b>	

Tutkimuksessa eri massojen 10 rinnakkaisnäytteen keskihajonta oli siis välillä 1,4–3,4 ml ja keskimäärin keskihajonta oli 2,6 ml. Toistettavuus taas oli keskimäärin 7,2 ml eli 31,4 %. Standardissa SFS-EN 12697-16 (2016) on määritetty Prall-menetelmän toistettavuudeksi 15 %. Massakohtaiset toistettavuuden arvot ja standardissa määritetty toistettavuus on myös esitetty kuvassa 72.





Kuva 72. Tutkimuksen SMA 16 -näytteiden toistettavuudet ja standardissa määritetty toistettavuus.

Taulukosta 41 ja kuvasta 72 ilmenee, että kaikilla massoilla 10 rinnakkaisnäytteen toistettavuus ylittää standardissa määritetyn toistettavuuden. Kokonaisuudessaan FI 20 -näytteiden toistettavuus oli hieman parempi kuin FI 0- ja FI 10 -näytteiden toistettavuudet. Pääosin massakohtaiset toistettavuudet olivat välillä 28–37 %, mutta massan D FI 20 -näytteillä toistettavuus oli 19 % eli hieman parempi kuin muilla massoilla.

Kirjallisuusselvityksessä ilmenneet haasteet Prall-menetelmän yksittäistulosten suuressa hajonnassa ja heikossa toistettavuudessa havaittiin siis myös tässä tutkimuksessa. Vuonna 2016 pohjoismaisessa vertailukokeessa Prall-menetelmän toistettavuudeksi saatiin keskimäärin noin 18 % ja pelkästään SMA 16 -näytteitä tarkasteltaessa noin 26 % (Waldemarson & Viman 2017). Tämän tutkimuksen toistettavuus (31 %) oli siis suuri pohjoismaisen vertailukokeen keskimääräiseen toistettavuuteen verrattuna, mutta melko lähellä kuitenkin saman vertailukokeen SMA 16 -näytteiden toistettavuutta.

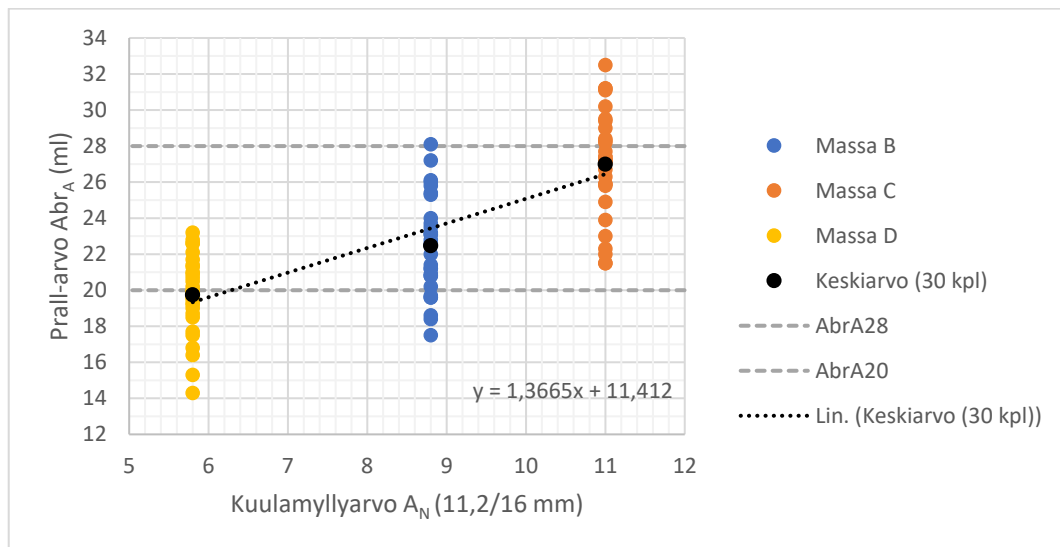
Suuren hajonnan vuoksi rinnakkaistuloksia tarkasteltiin myös Dixonin ja Grubbsin yhden poikkeavan tuloksen testeillä mahdollisten tilastollisesti poikkeavien ääriarvojen havaitsemiseksi. Kummallakaan testillä tuloksissa ei kuitenkaan ilmennyt poikkeavia ääriarvoja, joita olisi ollut syytä poistaa tarkastelusta. Rinnakkaistulokset testattiin myös Grubbsin kaksipuoleisella testillä. Grubbsin kaksipuoleisessa testissä poistetaan 2 suurinta tai pienintä arvoa tarkastelusta ja tarkastellaan, pysyvätkö muut arvot pois normaalijakauman ääripäistä (Kinnunen 2019). Tälläkään testillä rinnakkaistuloksissa ei havaittu tarkastelusta poistettavia ääriarvoja.

Tarkastellaan vielä, miten rinnakkaisnäytteiden suuri määrä vaikutti hajontaan, toistettavuuteen ja tilastollisesti poikkeaviin ääriarvoihin. Tyypillisesti Prall-arvo määritetään 4–5 rinnakkaisesta näytteestä, joten kultakin louhokselta valittiin 5 satunnaista näytettä tarkasteluun. Viidellä satunnaisella tuloksella massan keskihajonnaksi tuli keskimäärin 2,1 ml, joten keskihajonta hieman pieneni näytteiden määrän pienetessä. Vastaavasti pienemmällä näytemäärällä keskimääräinen toistettavuus parani arvoon 26 %, joten rinnakkaisnäytteiden suuri

määrä saattoi siis jopa hieman suurentaa hajontaa. Myös nämä 5 rinnakkaistulosta tarkasteltiin Dixonin ja Grubbsin yhden poikkeavan tuloksen testeillä mahdollisten tilastollisten poikkeavien ääriarvojen havaitsemiseksi. Dixonin menetelmällä poikkeavia ääriarvoja ei löytynyt viidestä tuloksesta. Sen sijaan Grubbsin testin perusteella yhden massan yksi tulos oli tilastollisesti poikkeava (straggler), muttei kuitenkaan virheellinen.

## 9.2 Kuulamylyarvon vaikutus Prall-arvoon

Tarkastellaan asfalttimassan karkean kiviaineksen kuulamylyarvon vaikutusta Prall-arvoon. Kuvassa 73 on esitetty eri louhosten kiviaineksista valmistettujen 30 Prall-näytteen yksittäistulokset ja keskiarvot sekä lajitteen 11,2/16 mm kuulamylyarvo.



Kuva 73. SMA 16 -näytteiden Prall-yksittäistulokset ja 30 näytteen keskiarvo louhoksittain sekä lajitteen 11,2/16 mm kuulamylyarvo.

Kuvasta 73 ilmenee lajitteen 11,2/16 mm kuulamylyarvon ja Prall-tulosten keskiarvon välinen lineaarinen yhteys: kuulamylyarvon kasvaessa kolmella yksiköllä suurenee Prall-tulosten keskiarvo noin 4 yksikköä. Prall-keskiarvojen perusteella kuulamylyarvon 5,8 karkeasta kiviaineksesta valmistetut näytteet kuuluivat Asfalttinormien (2017) luokkaan  $A_{brA_{max}20}$ , kun taas kuulamylyarvojen 8,8 ja 11 kiviaineksista valmistetut näytteet luokkaan  $A_{brA_{max}28}$ . Prall-yksittäistulokset sijoittuvat kuitenkin kullakin kuulamylyarvolla useampaan eri Prall-luokkaan.

Taulukossa 5 esitettiin Asfalttinormien (2017) mukaiset esimerkit massan Prall-luokan valinnalle kuulamylyarvon perusteella. Taulukon mukaan kuulamylyluokan  $A_N7$  kiviaineksesta valmistetun SMA 16 -näytteen Prall-luokka voisi olla  $A_{brA_{max}20}$ –28 ja kuulamylyluokan  $A_N10$  valmistetun näytteen  $A_{brA_{max}28}$ –36. Tutkimuksen Prall-tulokset vastaavat pääosin näitä luokkia: lineaarisen yhteyden perusteella kuulamylyluokan  $A_N7$  kiviaineksesta valmistetuilla näytteillä Prall-keskiarvo vaikuttaisi olevan suurimmillaan noin 21 ml ja luokan  $A_N10$  kiviaineksella taas suurimmillaan noin 25 ml.

Verrataan havaittuja Prall-tuloksia kappaleessa 5.4 esitettyyn laskennallisen kulumisnopeuden kaavaan, jolla voidaan arvioida Prall-arvo kiviaineksen kuulamylyarvon perusteella. Kaavoissa 7 ja 9 esitetty Prall-arvon ja kuulamylyarvon välinen yhteys saadaan SMA 16 -massalla muotoon

$$Abr_A = 1,08 \cdot (9,4 + 2,21 \cdot KM) - 6. \quad (19)$$

Verrataan saatuja tuloksia myös Ruotsin vastaavaan kaavaan. Kaavat 10 ja 11 yhdistämällä Prall-arvolle ja kuulamylyarvolle saadaan yhteys

$$Abr_A = [(2,493 + 0,144 \cdot KM - 0,069 \cdot 16 - 0,017 \cdot 75) - 0,32] / 0,04, \quad (20)$$

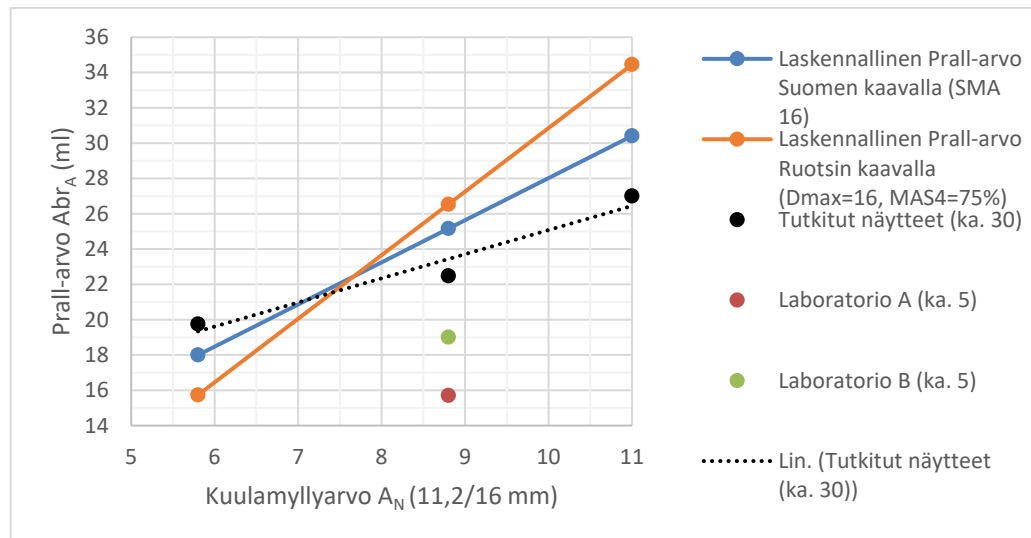
kun tutkitaan maksimiraekooltaan 16 mm massaa, jossa yli 4 mm kiviainesta on 75 %.

Taulukossa 42 on esitetty kaavoilla 19 ja 20 määritetyt laskennalliset Prall-arvot tutkimuksen massojen 11,2/16 mm lajitteen kuulamylyarvojen perusteella. Taulukossa on myös esitetty tutkimuksessa saadut 30 näytteen Prall-keskiarvot eri louhosten kiviaineksille.

*Taulukko 42. Tutkimuksen 11,2/16 mm lajitteen kuulamylyarvojen perusteella määritetyt laskennalliset Prall-arvot sekä tutkitut Prall-arvot SMA 16 -näytteillä.*

Massa	Kuulamylyarvo (11,2/16 mm)	Laskennallinen Prall-arvo (Suomi)	Laskennallinen Prall-arvo (Ruotsi)	Tutkittu Prall- arvo (ka. 30 kpl)
Massa B	8,8	25,2	26,5	22,5
Massa C	11,0	30,4	34,5	27,0
Massa D	5,8	18,0	15,7	19,7

Taulukossa 42 esitetyt laskennalliset ja tutkitut Prall-arvot on myös esitetty kuvassa 74. Kuvassa 74 on myös esitetty vertailulaboratorioiden viiden näytteen Prall-keskiarvot.



Kuva 74. Kuulamylyarvon perusteella määritetyt laskennalliset Prall-arvot sekä Tampereen yliopistossa tutkittujen 30 näytteen Prall-keskiarvot ja vertailulaboratorioissa tutkittujen viiden näytteen Prall-keskiarvot SMA 16 -näytteillä.

Kuvan 74 perusteella Tampereen yliopistossa tutkittujen näytteiden tulokset vastaavat noin kuulamylyarvolla  $A_N7$  Suomen laskennallisen Prall-arvon kaavaa. Pienemmillä kuulamylyarvoilla Suomen kaava vaikuttaa hieman aliarvioivan kulumaa, kun taas suurilla kuulamylyarvoilla yliarvioivan kulumaa. Kuulamylyarvolla  $A_N10$  Suomen laskennallisen Prall-arvon kaava yliarvioi kulumaa noin 3 yksikköä eli 12 prosenttia Tampereen yliopiston tuloksiin verrattuna. Vertailulaboratorioiden A ja B Prall-tulokset ovat Tampereen yliopistossa tutkittuja tuloksia pienemmät, eli niihin verrattuna Suomen laskennallisen Prall-arvon kaava yliarvioi kulumaa enemmän. Myös Hietala ja Kuula (2019) havaitsivat Suomen kaavalla määritetyn laskennallisen Prall-arvon yliarvioivan kulumaa: kyseisen tutkimuksen AB 16 -näytteillä laskennallinen Prall-arvo oli noin 7–10 yksikköä eli 30–40 prosenttia todellista Prall-arvoa suurempi.

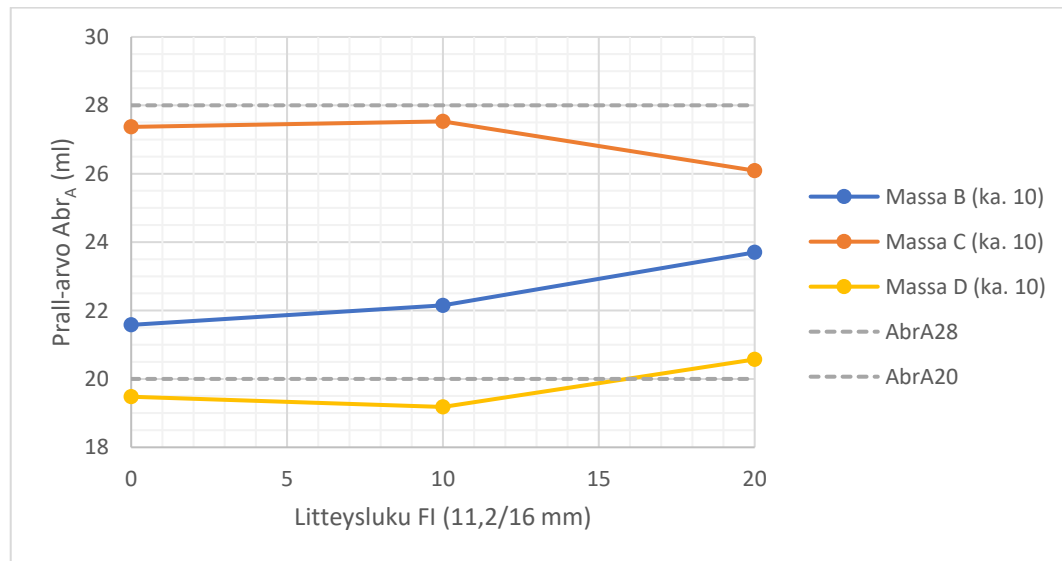
Ruotsin laskennallisen Prall-arvon kaavalla kuulamylyarvon muutos vaikuttaa Prall-arvoon Suomen kaavaa voimakkaammin. Kuvan 74 perusteella pienillä kuulamylyarvoilla Ruotsin kaavalla määritetty laskennallinen Prall-arvo aliarvioi Tampereen yliopistossa mitattua kulumaa enemmän kuin Suomen kaavalla määritetty, ja vastaavasti suurilla kuulamylyarvoilla yliarvioi kulumaa enemmän kuin Suomen kaavalla määritetty. Näistä laskennallisen Prall-arvon kaavoista siis tutkimuksen havaintoja lähempänä on Suomen kaava.

Tässä tutkimuksessa eri asfalttimassoihin vaihdettiin vain yli 11,2 mm:n lajitetta, ja tarkastelu kuulamylyarvon vaikutuksesta Prall-arvoon pohjautui siten vain yli 11,2 mm:n lajitteeseen. Eri massoissa lajite 0/11,2 mm pidettiin vakiona ja sen kuulamylyarvo oli noin 8,8. Kirjallisuusselvityksessä ilmeni esimerkiksi, että Robertsenin (2018) tutkimuksen havaintojen mukaan alle 8 mm lajitteen lujuudella ei ollut vaikutusta Prall-arvoon, kun taas Siebertin ja Morkin (2016) tutkimuksen havaintojen mukaan alle 4 mm lajitteen lujuudella ei ollut vaikutusta Prall-arvoon. Voikin olla, että alle 11,2 mm kiviaineksen lujuus vaikutti jonkin verran Prall-tuloksiin massoilla C ja D. Jos massat olisi valmistettu kokonaan samasta

kiviaineksesta, olisi Prall-arvo saattanut olla hieman suurempi suurilla kuulamylyarvoilla ja vastaavasti hieman pienempi pienillä kuulamylyarvoilla.

### 9.3 Litteysluvun vaikutus Prall-arvoon

Tarkastellaan asfalttimassan karkean kiviaineksen litteysluvun mahdollista vaikutusta Prall-arvoon. Kuvassa 75 on esitetty eri massojen lajitteen 11,2/16 mm litteysluku ja 10 Prall-näytteen keskiarvot litteyslukutasoittain.



Kuva 75. Lajitteen 11,2/16 mm litteysluku ja Prall-arvojen keskiarvo SMA 16 -näytteillä.

Kuvasta 75 ilmenee, että massoista B ja D valmistetuilla näytteillä litteysluvun suurentaminen suurensi Prall-tulosten keskiarvoa hieman. Sen sijaan massan C kiviaineksesta valmistetuilla näytteillä litteysluvun suurentaminen pienensi hieman Prall-tulosten keskiarvoa. Kaikilla massoilla Prall-keskiarvo pysyi kuitenkin noin kahden yksikön sisällä, kun litteyslukua muokattiin 20 yksikköä. Massojen keskiarvot eri litteyslukutasoilla pysyivät muutoin samassa Asfalttinormien (2017) Prall-luokassa, mutta massalla D luokka vaihtui litteysluvun muuttuessa tasolta FI 10 tasolle FI 20. Taulukoon 43 on koottu massoittain litteysluvun muutosta vastaavat Prall-arvon muutokset.

Taulukko 43. Yhteenveto Prall-arvon muutoksista litteysluvun muuttuessa SMA 16 -näytteillä.

Massa	Prall-arvon muutos, kun FI 0 → 10	Prall-arvon muutos, kun FI 10 → 20	Prall-arvon muutos, kun FI 0 → 20
Massa B	+0,6 ml	+1,5 ml	+2,1 ml
Massa C	+0,1 ml	-1,4 ml	-1,3 ml
Massa D	-0,3 ml	+1,4 ml	+1,1 ml

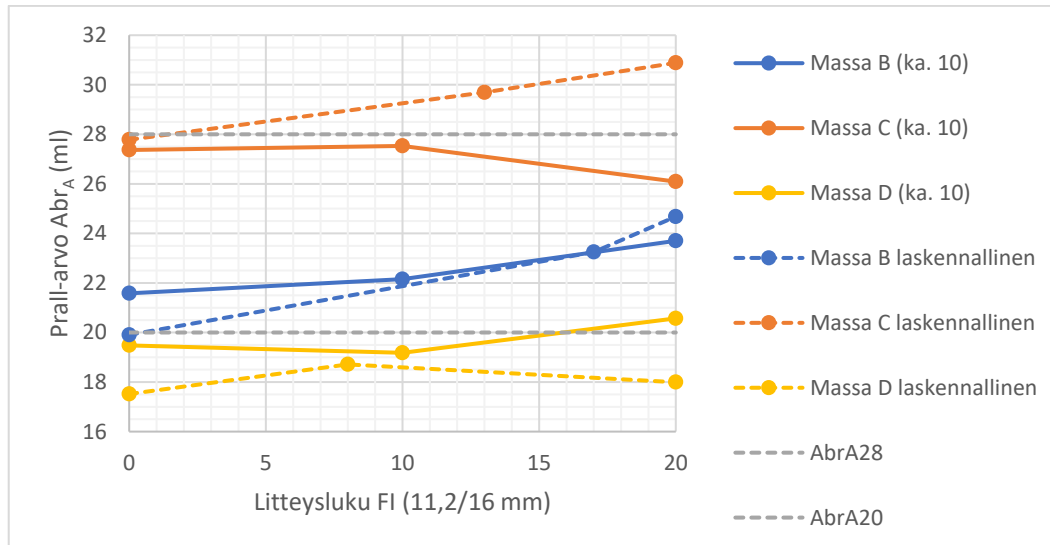
Kaikkien massojen Prall-arvoon vaikutti siis enemmän litteysluvun muuttaminen tasolta FI 10 tasolle FI 20 kuin litteysluvun muuttaminen tasolta FI 0 tasolle FI 10. Kokonaisuudessaan litteysluvun muuttamisen aiheuttamat muutokset Prall-keskiarvoissa eivät olleet kovin suuria, kun ottaa huomioon, että saman massan ja litteyslukutason yksittäistulokset vaihtelivat suurimmillaan jopa 10 yksikköä. Yksittäistulokset massoittain ja litteyslukutasoittain on esitetty liitteen B kuvaajissa. Kaikilla massoilla ja litteyslukutasoilla yksittäistulokset jakaantuivat kahden eri Asfalttinormien (2017) mukaisen Prall-luokan alueelle.

Hietala & Kuula (2019) havaitsivat AB 16 -massasta valmistetuilla näytteillä Prall-arvon kasvavan 1,9 yksikköä, kun karkean kiviaineksen litteyslukua suurennettiin 10 yksikköä. Kyseisten näytteiden karkea kiviaines oli samaa kiviainestyyppiä kuin tämän tutkimuksen massassa B. Tässä tutkimuksessa massasta B valmistetuilla SMA 16 -näytteillä vastaava Prall-arvon muutos oli keskimäärin noin 1,1 yksikköä eli 42 % AB-näytteiden muutosta pienempi. Tämän perusteella vaikuttaisi, että karkean kiviaineksen muoto vaikuttaa Prall-arvoon enemmän AB-näytteillä kuin SMA-näytteillä. Toisaalta, kun tarkastellaan muutosta tasolta FI 10 tasolle FI 20, oli vastaava Prall-arvon muutos SMA-näytteillä enää vain noin 0,4 yksikköä pienempi kuin AB-näytteillä.

Alkio (2001) taas tutki litteysluvun muutoksen vaikutusta SMA-näytteiden Prall-arvoon. Tutkimuksessa havaittiin karkean kiviaineksen litteysluvun 10 yksikön suurentamisen suurentavan Prall-arvoa pääosin noin 1,4–1,7 yksikköä, mutta suurimmillaan graniitista valmistetuilla näytteillä muutos oli jopa 4 yksikköä. Tässä tutkimuksessa havaitut muutokset olivat pienempiä: Prall-arvo muuttui suurimmillaankin vain noin 1,4 yksikköä 10 yksikön litteysluvun muutosta kohden massalla D.

Hietalan ja Kuulan (2019) sekä Alkion (2001) tutkimuksissa asfalttimassoissa eri litteyslukutasoilla muokattiin 8/16, 8/18 tai 8/20 mm:n lajitetta, kun taas tässä tutkimuksessa muokattiin 11,2/16 mm:n lajitetta. Saattaakin olla, että ero muokatun kiviaineksen määrässä selittää eroa Prall-arvon muutoksissa litteyslukutason muuttuessa. Esimerkiksi tämän tutkimuksen asfalttimassan tavoitekäyrän perusteella lajite 11,2/16 mm vastaa noin 44 prosenttia massan kiviaineksesta, kun taas lajite 8/16 mm vastaa noin 63 prosenttia massan kiviaineksesta.

Hietala & Kuula (2019) tutkivat litteysluvun muutoksen vaikutusta kuulamyllyarvoon tämän tutkimuksen kiviainestyypeillä. Kuvassa 76 on esitetty tässä tutkimuksessa saadut Prall-arvon ja litteysluvun suhteet. Kuvassa on myös esitetty laskennalliset Prall-arvot, jotka on määritetty kaavalla 19 julkaisussa Hietala & Kuula (2019) havaittujen kuulamyllyarvon ja litteysluvun suhteiden perusteella.



Kuva 76. Tutkitut SMA 16 -näytteiden Prall-arvot ja julkaisun Hietala & Kuula (2019) kuulamylyarvo-litteysluku-suhteen avulla määritetyt laskennalliset Prall-arvot.

Kuvasta 76 ilmenee, että massalla B kuulamylyarvon perusteella määritetty laskennallinen Prall-arvo suureni litteysluvun muuttuessa ja samoin suureni myös tutkittu Prall-arvo. Muutos oli kuitenkin hieman pienempi tutkitussa Prall-arvossa kuin kuulamylyarvon perusteella määritetyssä. Massalla C laskennallinen Prall-arvo suureni litteysluvun kasvaessa, mutta tutkittu Prall-arvo pieneni hieman. Massalla D taas laskennallinen Prall-arvo pysyi melko vakiona, kuten myös tutkittu Prall-arvo.

Kuvan 76 perusteella kuulamylyarvo saattaa siis muuttua enemmän kuin Prall-arvo kiviaineksen muodon muuttuessa. Tämä ei kuitenkaan suoraan tarkoita, että kiviaineksen muotoa murskausprosessissa parannettaessa kuulamylyarvo suurenisi enemmän kuin päällysteen kulumiskestävyys. Tutkimuksen massoissa B ja D karkea kiviaines oli kubisoitua, kun taas massassa C karkea kiviaines ei ollut kubisoitu. Kubisoiduista kiviaineksista valmistetuissa massoissa B ja D litteysluvun muokkaamisella oli samantyyppinen vaikutus sekä kuulamylyarvoon että Prall-arvoon, kun taas kubisoimattomasta kiviaineksesta valmistetulla massalla C erityyppinen. Tähän voi tosin vaikuttaa murskausprosessin lisäksi moni muukin tekijä, sillä esimerkiksi massan C karkea kiviaines koostui selvästi kahdesta erityyppisestä kiviaineksesta, mikä voi aiheuttaa hajontaa tuloksiin.

Kokonaisuudessaan kubisoinnilla voidaan vaikuttaa vain rajoitetusti kuulamylyarvoon, esimerkiksi julkaisussa Hietala & Kuula (2019) kubisoinnin havaittiin parantavan graniittisen kiviaineksen kuulamylyarvoa 2–3 yksikköä. Kubisoinnin avulla siis voidaan saada kuulamylyluokan rajalla olevasta kiviaineksesta seuraavaan kuulamylyluokkaan soveltuvaa asfalttikiviainesta ja näin esimerkiksi hyödynnettyä päällystyskohteessa paikallista kiviainesta kauempaa tuotavan sijaan. Lisäksi kiviaineksen muotoilulla voidaan epäsuorasti parantaa päällysteen nastarengaskulumiskestävyyttä, sillä esimerkiksi hyvämuotoisella kiviaineksella asfalttimassan tiivistettävyyden paranevat ja samalla päällysteen tyhjätilet pienenevät. Voi myös olla mahdollista, että kiviaineksen muodon vaikutus päällysteen kulumiskestävyyteen ilmenee eri tavoin Prall-laitteella mitattuna kuin nas-

tarenkaiden kuluttaessa päällystettä. Esimerkiksi Göranssonin et al. (2018) tutkimuksessa kubisoidusta kiviaineksesta valmistetun näytteen Prall-arvo oli 0,7 yksikköä suurempi kuin kubisoimattomasta kiviaineksesta valmistetun, mutta koetielaitteessa kiviaineksen kubisoinnin havaittiin pienentävän kulumaa 20 %.

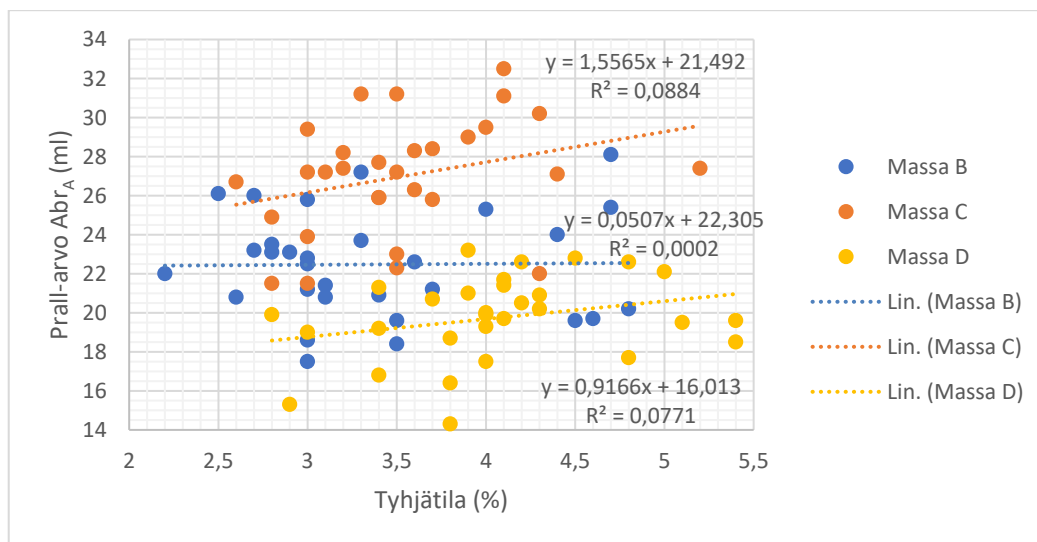
## 9.4 Tyhjätilan vaikutus Prall-arvoon

Tarkastellaan seuraavaksi näytteen tyhjätilan mahdollista vaikutusta Prall-arvoon ja rinnakkaisnäytteiden hajontaan. Asfalttinormien (2017) mukaan tieltä poratun SMA 16 -näytteen tyhjätilan tulee olla korkeintaan 6 % ja massan suunnittelussa tyhjätilan ohjeellinen arvo on 2–5 %. Tutkimuksessa kaikkien Prall-näytteiden tyhjätilat olivat ohjealueella. Näytteiden tyhjätilat eri litteyslukutasoilla pyrittiin vakioimaan muokkaamalla hieman jyräysprosessia. Taulukossa 44 on esitetty 10 rinnakkaisnäytteen tyhjätilan keskiarvot massoittain ja litteyslukutasoittain.

Taulukko 44. SMA 16 -näytteiden tyhjätilojen keskiarvot massoittain ja litteyslukutasoittain.

Massa	FI 0	FI 10	FI 20
Massa B	3,5 %	3,3 %	3,4 %
Massa C	3,9 %	3,3 %	3,4 %
Massa D	4,5 %	4,0 %	3,8 %

Kuvassa 77 on esitetty Tampereen yliopistossa tutkittujen 90 näytteen tyhjätilat ja Prall-arvot.

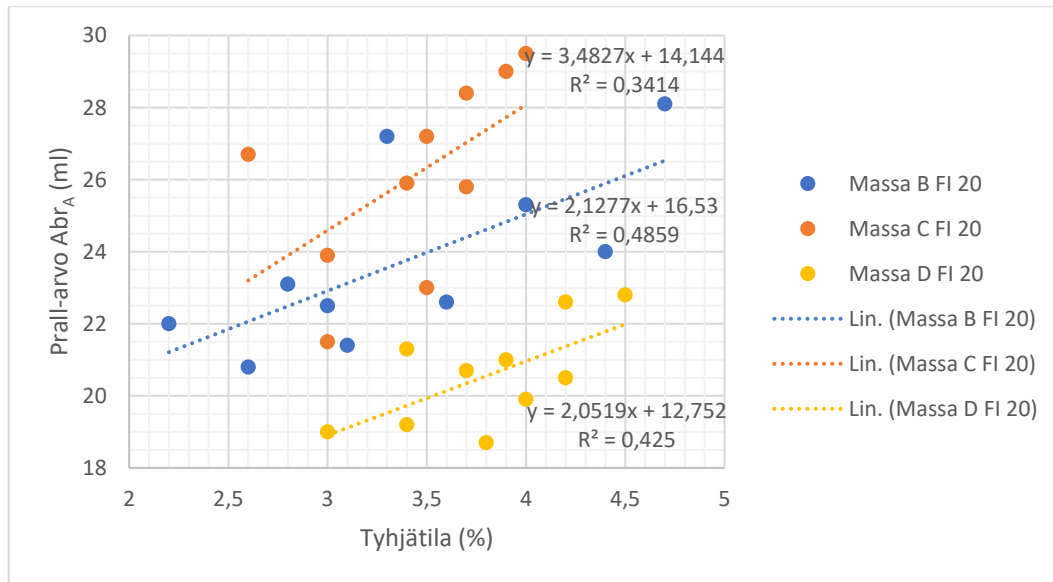


Kuva 77. SMA 16 -näytteiden tyhjätilat ja Prall-arvot.

Kuvasta 77 ilmenee, ettei kaikkia näytteitä tarkasteltaessa ilmene selkeää yhteyttä näytteen tyhjätilan ja Prall-arvon välillä. Massojen C ja D näytteitä tarkasteltaessa Prall-arvo kuitenkin saattaa hieman suurentua tyhjätilan kasvaessa: tyhjätilan kasvaessa yhden prosenttiyksikön Prall-arvo vaikuttaisi suurenevan noin 0,9–1,6 yksikköä lineaaristen sovitusten perusteella.



Eri massojen näytteiden tyhjätilat ja Prall-arvot on esitetty litteyslukutasoittain liitteessä C. Massoilla C ja D kaikilla litteyslukutasoilla näytteen tyhjätilan kasvaessa myös kuluma vaikuttaa suurenevan. Sen sijaan massalla B on hajontaa eri litteyslukutasojen välillä. Kaikilla massoilla yhteys Prall-arvon ja tyhjätilan välillä on kuitenkin vahvin FI 20 -tason näytteillä. Kuvaan 78 on koottu eri massojen FI 20 -tason näytteiden tyhjätilat ja Prall-arvot.



Kuva 78. SMA 16 -näytteiden tyhjätilat ja Prall-arvot FI 20 -tasolla.

Kuvasta 78 ilmenee, että FI 20 -tasolla kaikilla massoilla tyhjätilan kasvaessa Prall-arvo vaikuttaa suurenevan. Massoilla B ja D tyhjätilan kasvaessa yhden prosenttiyksikön suurenee Prall-arvo lineaarisen sovituksen mukaan hieman yli 2 yksikköä, kun taas massalla C vastaava Prall-arvon muutos on noin 3,5 yksikköä.

Kokonaisuudessaan tutkittujen näytteiden perusteella tyhjätilalla siis saattaa olla vaikutusta Prall-arvoon. Hietalan ja Kuulan (2019) sekä Pellisen ja Makowskan (2015) tutkimuksissa havaittiin näytteen tyhjätilan vaikuttavan Prall-testin tulokseen. Pellinen ja Makowska (2015) havaitsivat Prall-arvon suurenevan jopa 4 yksikköä näytteen tyhjätilan suurentuessa yhden prosenttiyksikön. Tässä tutkimuksessa vastaava muutos vaikutti suurimmillaan olevan 3,5 yksikköä, mutta pääosin tyhjätilan vaikutus oli kuitenkin pienempi. VTT:n vuonna 2006 tekemässä tutkimuksessa havaittiin näytteen tiheyden vaikuttavan Prall-arvoon vain kiviaineksen ollessa lujuudeltaan heikkoa (Laaksonen et al 2008). Tässä tutkimuksessa taas massan D eli kuulamylyarvon perusteella lujimmasta kiviaineksestä valmistetuilla näytteillä yhteys Prall-arvon ja tyhjätilan välillä oli vahvin, kun tarkastellaan erikseen kaikkia litteyslukutasoja.

Näytteen tyhjätilan ja Prall-arvon väliset korrelaatiot eivät kuitenkaan olleet kovin vahvoja, joten muutkin tekijät aiheuttavat rinnakkaisnäytteiden tuloksiin hajontaa. Vastaavaa on havaittu myös aiemmissa vertailukokeissa (Bäckström 2017; Viman & Hakim 2010). Huomioitavaa on myös, että tässä tutkimuksessa kaikkien näytteiden tyhjätilat olivat Asfalttinormien mukaisella ohjealueella,

eikä tuloksista siten ilmene tyhjätilan vaikutusta Prall-arvoon ohjealueelta poiketessa. Voi siis olla, että tyhjätilan vaikutus Prall-arvoon suurenee esimerkiksi näytteen tyhjätilan ollessa yli 6 %.

## 9.5 Tulosten vertailu laboratorioden välillä ja Prall-menetelmän uusittavuus

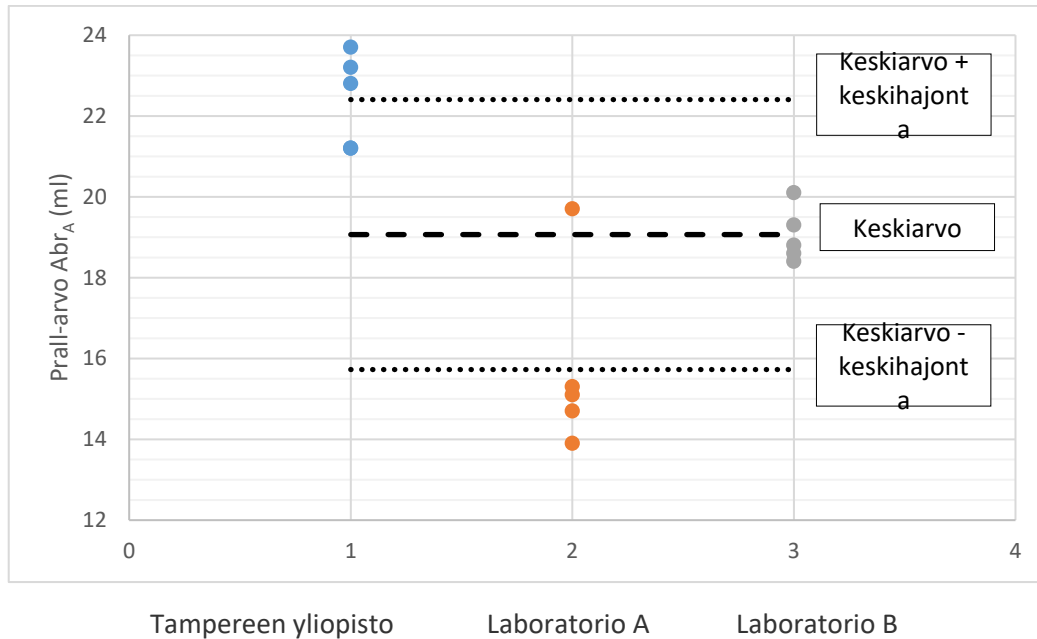
Vertaillaan seuraavaksi Prall-tuloksia laboratorioden välillä ja tarkastellaan Prall-menetelmän uusittavuutta. Massan B FI 10 -tason näytteitä vertailtiin kahdessa muussa laboratoriossa Suomessa. Kaikissa kolmessa tutkimukseen osallistuneessa laboratoriossa testit tehtiin modifioidulla Prall<sub>s</sub>-laitteella. Taulukossa 45 on esitetty tulosten vertailu laboratorioden välillä.

*Taulukko 45. SMA 16 -näytteiden Prall-tulosten vertailu laboratorioden välillä.*

	Tampereen yliopisto	Laboratorio A	Laboratorio B
Näytteiden määrä	10 kpl	5 kpl	5 kpl
Prall-keskiarvo	22,2 ml	15,7 ml	19,0 ml
Keskihajonta	2,8 ml	2,3 ml	0,7 ml
Yksittäistulosten vaihteluväli	17,5–26,1 ml	13,9–19,7 ml	18,4–20,1 ml

Tampereen yliopiston laboratoriossa tutkittiin siis 10 näytettä, joiden keskiarvoksi saatiin 22,2 ml. Laboratorioissa A ja B tutkittiin molemmissa 5 näytettä, joiden Prall-tulosten keskiarvoksi laboratorio A sai 15,7 ml ja laboratorio B 19,0 ml. Yksittäistulosten keskihajonta oli suurin Tampereen yliopiston laboratoriossa ja pienin laboratoriossa B.

Tarkastellaan tarkemmin yliopiston näytteistä viittä keskimmäistä tulosta, jolloin yliopiston Prall-tulosten keskiarvo on 22,4 ml. Tällöin kolmen laboratorion väliseksi keskiarvoksi saadaan 19,1 ml ja niiden keskihajonnaksi 3,3 ml. Kuvassa 79 on esitetty kunkin laboratorion 5 yksittäistulosta sekä laboratorioden välinen keskiarvo ja keskihajonta.



Kuva 79. Laboratorioiden 5 yksittäistulosta sekä niiden välinen keskiarvo ja keskihajonta SMA 16 -näytteillä.

Kuvasta 79 ilmenee, että laboratorio B:n tulokset ovat lähimpänä laboratorioiden välistä keskiarvoa ja kaikki laboratorio B:n yksittäistulokset ovat keskihajonnan etäisyydellä keskiarvosta. Sen sijaan Tampereen yliopiston yksittäistuloksista vain kaksi tulosta ja laboratorion A yksittäistuloksista yksi tulos ovat keskihajonnan etäisyydellä laboratorioiden välisestä keskiarvosta.

Lasketaan tulosten perusteella toistettavuuden ja uusittavuuden arvot. Toistettavuus saadaan kaavalla 17. Uusittavuus taas saadaan kaavalla

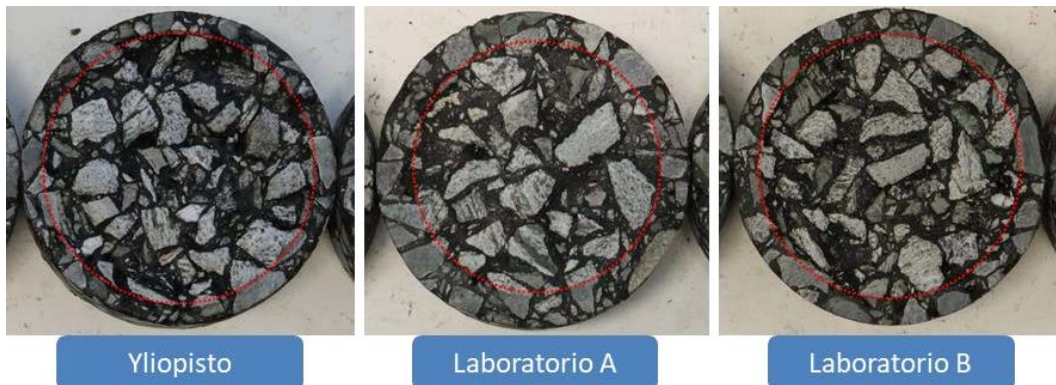
$$R = \sqrt{s_R^2} \cdot 2,8 \quad (21)$$

missä  $s_R$  on uusittavuusvarianssi (Kinnunen 2019). Toistettavuus- ja uusittavuusvarianssien kaavat on esitetty standardissa ISO 5725-2 (1994). Kun huomioidaan Tampereen yliopiston 5 keskimmäistä tulosta, saadaan kolmen laboratorion toistettavuudeksi 22 % ja uusittavuudeksi 53 %. Standardissa SFS-EN 12697-16 (2016) Prall-menetelmän toistettavuudeksi on määritetty 15 % ja uusittavuudeksi 27 %, eli tutkimuksen arvot ovat selvästi tätä suuremmat. Vuonna 2016 pohjoismaisessa vertailukokeessa 21 laboratorion välillä SMA 16 -näytteiden toistettavuudeksi määritettiin 26 % ja uusittavuudeksi 38 % (Waldemarson & Viman 2017). Nämä ovat hieman lähempänä tutkimuksessa havaittua tasoa kuin standardissa määritetyt arvot, mutta tutkimuksessa havaitut erot laboratorioiden välillä ovat silti suuria. Tarkastellaan vielä toistettavuuden ja uusittavuuden tasoa, mikäli Tampereen yliopiston rinnakkaistuloksista huomioitaisiinkin 5 pienintä tulosta. Tällöin saadaan toistettavuudeksi 25 % ja uusittavuudeksi 41 %, mitkä ovat lähellä pohjoismaisen vertailukokeen SMA 16 -näytteiden arvoja.

Myös nämä vertailulaboratorioiden rinnakkaistulokset tarkasteltiin tilastollisten poikkeamien havaitsemiseksi Dixonin menetelmällä sekä Grubbsin menetelmällä yhden poikkeavan tuloksen osalta. Laboratoriolla A suurin tulos (19,7 ml) oli Dixonin testin perusteella poikkeava. Sama tulos oli Grubbsin testin perusteella tilastollisesti poikkeava (straggler), muttei kuitenkaan virheellinen. Laboratoriolla B ei ollut tilastollisen tarkastelun perusteella poikkeavia tuloksia.

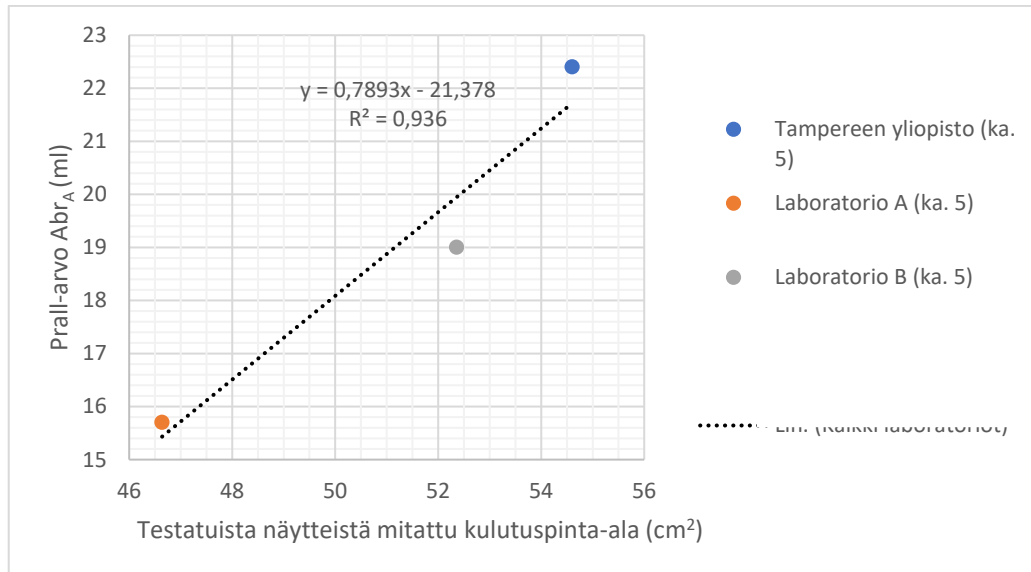
Aiemmin havaittiin, että näytteen tyhjätilalla saattaa olla vaikutusta Prall-tulokseen. Näytteet eri laboratorioihin jaettiin kahdesta asfalttilaatasta niin, että kulakin laboratoriolla oli testattavana tyhjätilaltaan samankaltaisia näytteitä. Tampereen yliopistolla 10 näytteen tyhjätilat olivat välillä 2,5–4,8 %, laboratoriolla A viiden näytteen tyhjätilat välillä 2,1–4,1 % ja laboratoriolla B viiden näytteen tyhjätilat välillä 2,2–4,4 %. Laboratorioiden välillä tyhjätiloissa ei siis ollut juurikaan eroa. Näytteiden tyhjätilat on esitetty tarkemmin liitteessä C. Liitteestä ilmenee, että laboratoriolla A näytteen tyhjätila saattoi aiheuttaa jonkin verran hajontaa laboratorion sisäisiin tuloksiin. Laboratoriolla B taas rinnakkaisnäytteiden Prall-tulokset olivat lähellä toisiaan, eikä näytteen tyhjätilan ja Prall-arvon välillä vaikuta olevan yhteyttä.

Laboratoriot lähettivät testauksen jälkeen kappaleet takaisin Tampereen yliopiston laboratorioon vertailtavaksi. Kulutetuissa kappaleissa erottui silmä-määräisesti ero näytteen pinnan kulutetun osan suuruudessa laboratorioiden välillä. Tampereen yliopiston kappaleissa kokeessa kulutettu pinta-ala oli suurin ja kokeen ulkopuolelle jäänyt näytteen reuna ohuin. Laboratoriolla A taas reuna oli paksuin ja testissä kulutettu pinta-ala siten pienin. Kuvassa 80 on esitetty esimerkit eri laboratorioissa testatuista kappaleista.



Kuva 80. Eri laboratorioissa testattujen kappaleiden kulutuspinna-ala.

Kunkin laboratorion viidestä näytekappaleesta mitattiin kulutuksen ulkopuolelle jäävän reunan paksuus työntömitalla neljästä kohdasta ja niiden perusteella laskettiin keskiarvo kulutetulle pinta-alalle laboratoriokohtaisesti. Standardissa SFS-EN 12697-16 (2016) on määritetty kappaleen päälle tulevan kumirenkaan sisähalkaisijaksi 87,4 mm, jolloin kumirenkaan sisälle jää noin 60,0 cm<sup>2</sup> suuruinen alue. Yliopiston viidessä kappaleessa kulutettu alue oli keskimäärin noin 54,6 cm<sup>2</sup> suuruinen, laboratoriolla A noin 46,6 cm<sup>2</sup> suuruinen ja laboratoriolla B noin 52,4 cm<sup>2</sup> suuruinen. Kuvassa 81 on esitetty nämä pinta-alat ja kunkin laboratorion Prall-keskiarvo.



Kuva 81. SMA 16 -näytteiden kulutuspinna-alat ja Prall-keskiarvot eri laboratorioissa.

Kuvasta 81 ilmenee yhteys laboratorioiden Prall-arvon ja näytteen kulutetun pinta-alan välillä: mitä suurempi on näytteen kulutettu pinta-ala, sitä suurempi on myös Prall-keskiarvo. Näytteen kulutuspinna-alan suurentuessa noin 17 %, suureni laboratorion Prall-keskiarvo noin 41 %. Ero kulutuspinnan suuruudessa laboratorioiden välillä saattaa siis aiheuttaa eroa myös Prall-tulostasoon.

Pinta-alaerojen havaitsemisen jälkeen ilmeni, että Tampereen yliopistossa näytteen päälle asetettava kumirengas oli poikennut standardissa SFS-EN 12697-16 (2016) määrittelystä renkaasta. Standardissa kumirenkaan sisähalkaisijaksi on määritetty 87,4 (+0,2) mm ja paksuudeksi 6,3 (+0,2) mm, kun taas Tampereen yliopiston renkaan sisähalkaisija oli hieman yli 90 mm ja paksuus noin 4,3 mm. Laboratoriot A ja B olivat tehneet testit standardin mukaista kumirengasta käyttäen. Kumirengaspoikkeaman ilmenemisen jälkeen valmistettiin ylimääräinen asfalttilaatta, josta testattiin 10 vastaavaa näytettä standardin mukaisella kumirenkaalla Tampereen yliopiston laboratoriossa. Oletuksena oli, että uudella kumirenkaalla näytteen kulutuspinna-alan pienenemisen myötä laboratorioiden välinen tuloserä pienenisi eli myös Tampereen yliopiston Prall-tulos pienenisi. Uudella kumirenkaalla yliopiston näytteiden kulutuspinna-alat pienenevät, mutta tulostaso ja ero muihin laboratorioihin pysyvät samana tai jopa hieman kasvoivat: uudella renkaalla Tampereen yliopistossa 10 näytteen Prall-keskiarvoksi saatiin 23,2 ml ja viiden keskimmäisen tuloksen keskiarvoksi 22,0 ml. Kumirenkaan lisäksi Prall-laitteen osissa ja toiminnassa on kuitenkin paljon muitakin yksityiskohtia, jotka voivat vaikuttaa laitteen tulostasoon. Laboratorioiden välistä eroa voi myös aiheuttaa laitteen ikä: yliopiston Prall-laite oli aivan uusi ja laitteella oli tehty vain noin 25 testiä ennen tutkimuksen testien aloittamista. Muiden laboratorioiden laitteet sen sijaan olivat jo vanhempia. Kulutuksen myötä esimerkiksi laitteen välykset voivat kasvaa ja jäykkyys vähetä.

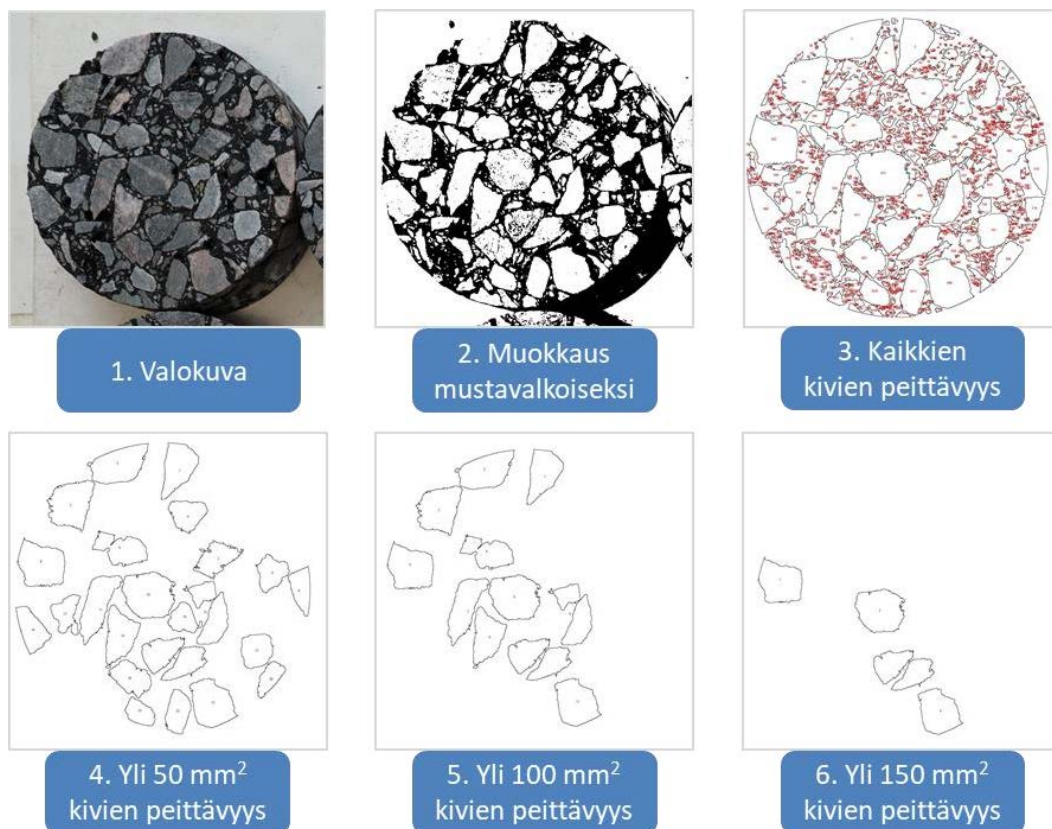
Laboratorioiden välillä oli myös eroja kuulasarjojen massoissa. Standardissa SFS-EN 12697-16 (2016) kuulasarjan massaksi on määritetty 265–285 g ja kuulien kooksi 11,50–12,01 mm. Yliopistolla käytössä olleen kuulasarjan massa oli ai-

van standardin ylärajalla, kun taas laboratoriolla A kuulasarjan massa oli pienempi (noin 268 g). Toisaalta pohjoismaisessa vertailukokeessa vuonna 2016 ei havaittu tulosten laboratorioiden välisen vaihtelun aiheutuvan eroista kuulasarjan massassa (Waldemarson & Viman 2017).

Tutkimuksen näytteiden jälkeen Tampereen yliopiston laitteella testattiin Suomen sisäisen Prall-vertailukokeen 2020 näytteet. Tulosten julkaisun jälkeen laitteiden välisistä eroista saadaan lisää tietoa.

## 9.6 Näytteiden pinnan kivisyyden vaikutus Prall-arvoon

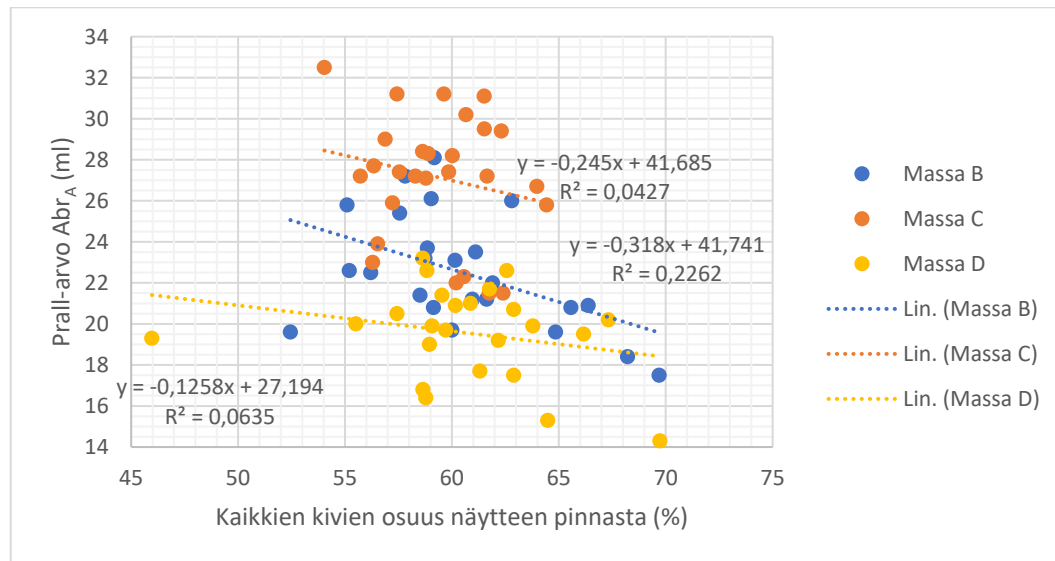
Rinnakkaisnäytteiden tulosten suuren hajonnan vuoksi näytteiden pintoja ja niiden kivipeitteisyyttä tarkasteltiin kuva-analyysillä. Näytteet kuvattiin ennen Prall-testiä ja sen jälkeen, ja nämä kuvat on esitetty liitteessä A. Ennen Prall-testiä näytteistä otetut valokuvat analysoitiin Fiji ImageJ -ohjelmalla. Aluksi kuvat näytteistä muokattiin mustavalkoisiksi niin, että kivien kohdat olivat valkoisia ja mastiksin osuus mustaa. Tämän jälkeen valkoisen alueen osuus analysoitiin ohjelmalla, jolloin saatiin määritettyä näytteen pinnan kivipeitteisyys ja samalla laskettua myös mastiksin osuus. Lisäksi näytteiden pinnasta analysoitiin yli 50 mm<sup>2</sup>, yli 100 mm<sup>2</sup> ja yli 150 mm<sup>2</sup> suuruisten kiven osuudet. Näiden pohjalta laskettiin näytteen pinnassa olevien alle 50 mm<sup>2</sup>, 50–100 mm<sup>2</sup> sekä 100–150 mm<sup>2</sup> suuruisten kiven osuudet. Kuva-analyysin vaiheet on esitetty kuvassa 82.



Kuva 82. Kuva-analyysin vaiheet.



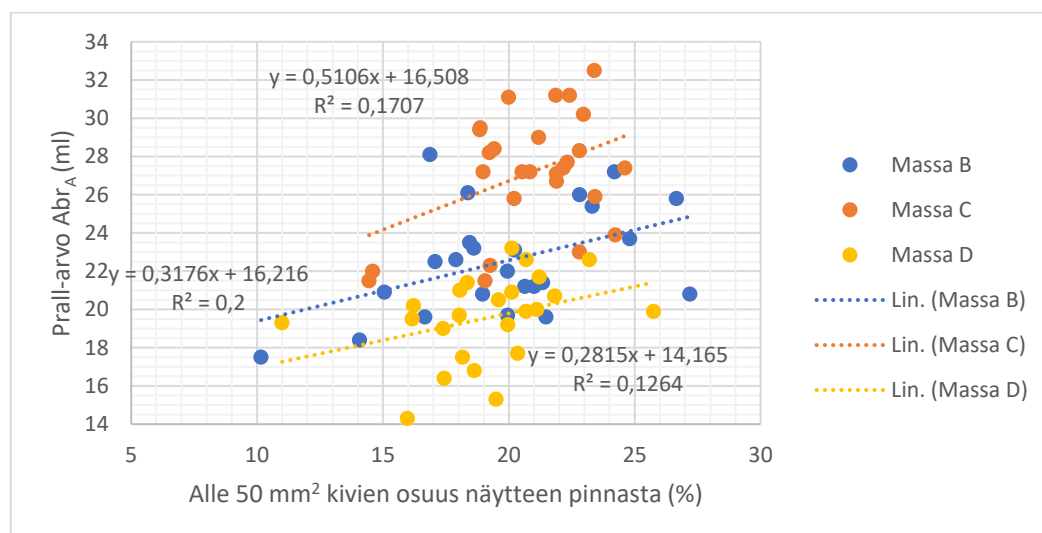
Tarkastellaan kuva-analyysin tuloksia. Kuvassa 83 on esitetty massakohtaisesti näytteen pinnan kaikkien kivien peittävyys ja näytteiden Prall-tulokset.



Kuva 83. SMA 16 -näytteiden pinnan kivipeitteisyys ja Prall-arvot.

Kuvan 83 perusteella näytteen pinnan kivipeitteisyys voi vaikuttaa Prall-arvoon: mitä enemmän näytteen pinnassa on kiviä, sitä vähemmän näyte vaikuttaa kuluun Prall-testissä. Lineaaristen sovitusten perusteella massan B näytteillä 10 prosenttiyksikön pinnan kivisyyden suureneminen vaikuttaa pienentävän Prall-arvoa hieman yli 3 yksikköä. Vastaava muutos on massan C näytteissä noin 2,5 yksikköä ja massan D näytteissä hieman yli 1 yksikön.

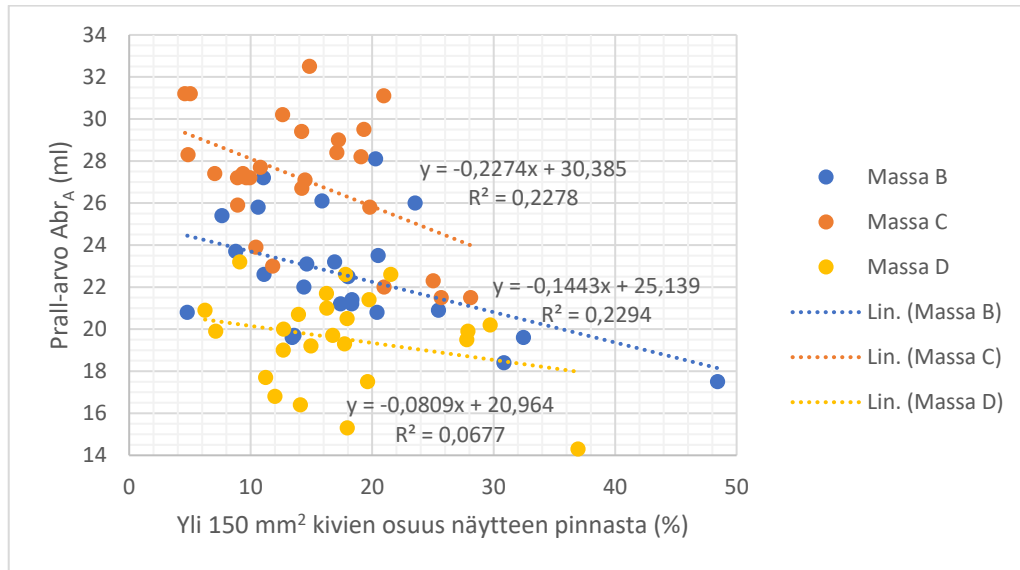
Kuvassa 84 on esitetty massoittain näytteiden pinnan alle 50 mm<sup>2</sup> kivien osuudet ja näytteiden Prall-tulokset.



Kuva 84. SMA 16 -näytteiden pinnan alle 50 mm<sup>2</sup> kivien osuus ja Prall-arvot.

Kuvasta 84 ilmenee, että myös näytteen pinnan pienien kivien osuus voi vaikuttaa Prall-arvoon. Mitä enemmän näytteen pinnassa on alle 50 mm<sup>2</sup> kiviä, sitä enemmän kappale vaikuttaa kuluvaan testissä. Kuvan 84 lineaaristen sovitusten perusteella näytteen pinnan pienien kivien osuuden kasvaessa 10 prosenttiyksiköllä Prall-arvo vaikuttaa suurenevan noin 3–5 yksikköä. Muutos on suurin massalla C, jossa on kuulamylyarvon perusteella heikointa kiviainesta.

Kuvassa 85 on esitetty massoittain näytteen pinnan yli 150 mm<sup>2</sup> kivien osuudet ja näytteiden Prall-tulokset.



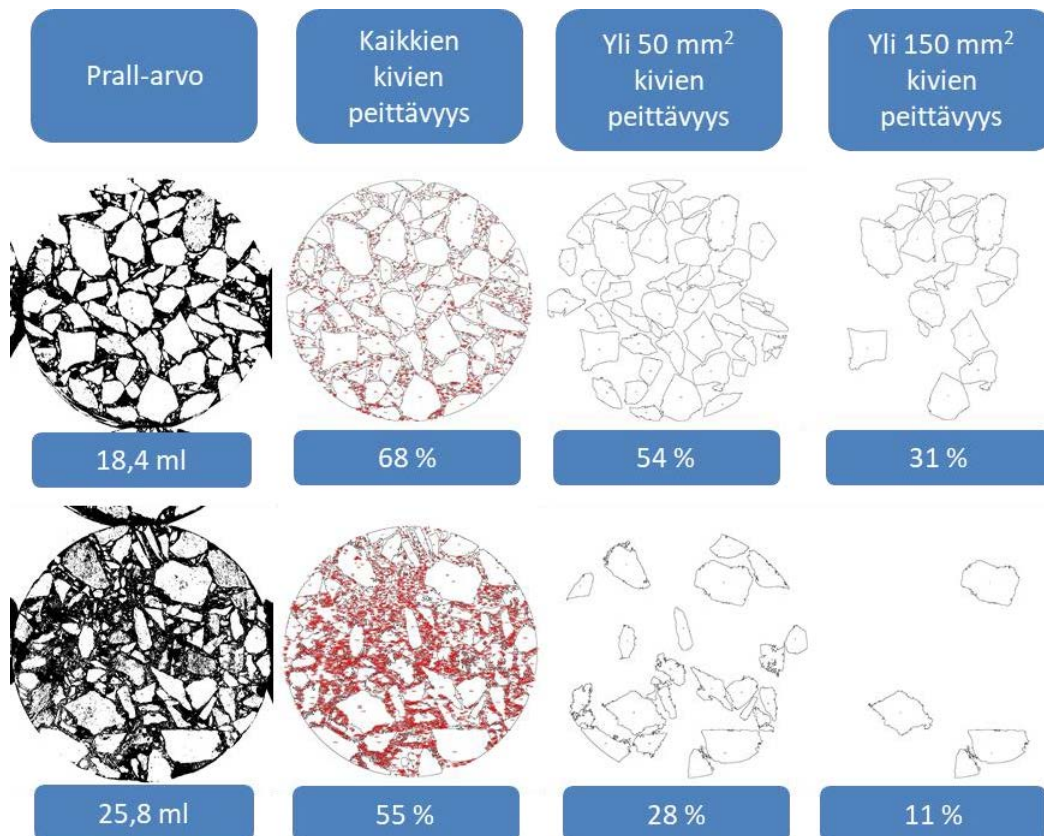
Kuva 85. SMA 16 -näytteiden pinnan yli 150 mm<sup>2</sup> kivien osuus ja Prall-arvot.

Kuvasta 85 ilmenee, että myös näytteen pinnan suurien kivien osuus voi vaikuttaa Prall-arvoon. Mitä enemmän näytteen pinnassa on suuria kiviä, sitä vähemmän näyte vaikuttaa kuluvaan testissä. Lineaaristen sovitusten perusteella näytteen pinnan suurien kivien osuuden kasvaessa 10 prosenttiyksiköllä Prall-arvo vaikuttaa pienenevän noin 0,8–2,3 yksikköä. Muutos on suurin massalla C, jossa on kuulamylyarvon perusteella heikointa kiviainesta, ja pienin massalla D, jossa on kuulamylyarvon perusteella lujinta kiviainesta.

Tarkastellaan tarkemmin massan B FI 0 -näytteitä. Kuvassa 86 on esitetty näytteiden pinnassa ennen testiä olleiden mastiksin ja eri kokoisten kivien osuudet sekä Prall-tulokset. Kuva-analyysin tulokset ja kuvaajat muille massoille on esitetty liitteessä D.



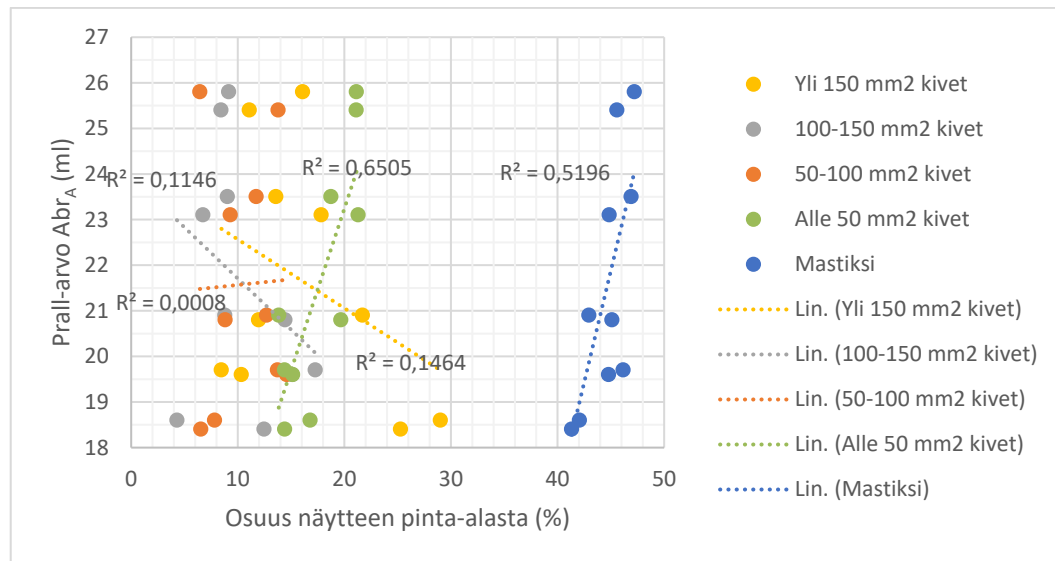




Kuva 87. Massan B FI 0 pienimmän ja suurimman Prall-tuloksen saaneen SMA 16 -näytteen pinnan kuva-analyysi.

Kuvasta 87 ilmenee, että pienimmän Prall-tuloksen saaneella näytteen pinnan kivipeitteisyys oli 68 % ja suurimman tuloksen saaneella 55 %, eli pienimmän tuloksen saaneen näytteen pinnassa oli 13 prosenttiyksikköä enemmän kiviä ennen testiä kuin suurimman tuloksen saaneen näytteen pinnassa. Vastaavasti yli 50 mm<sup>2</sup> kokoisten kivien peittävydessä oli eroa näytteiden välillä 26 prosenttiyksikköä ja yli 150 mm<sup>2</sup> kokoisten kivien peittävydessä 20 prosenttiyksikköä.

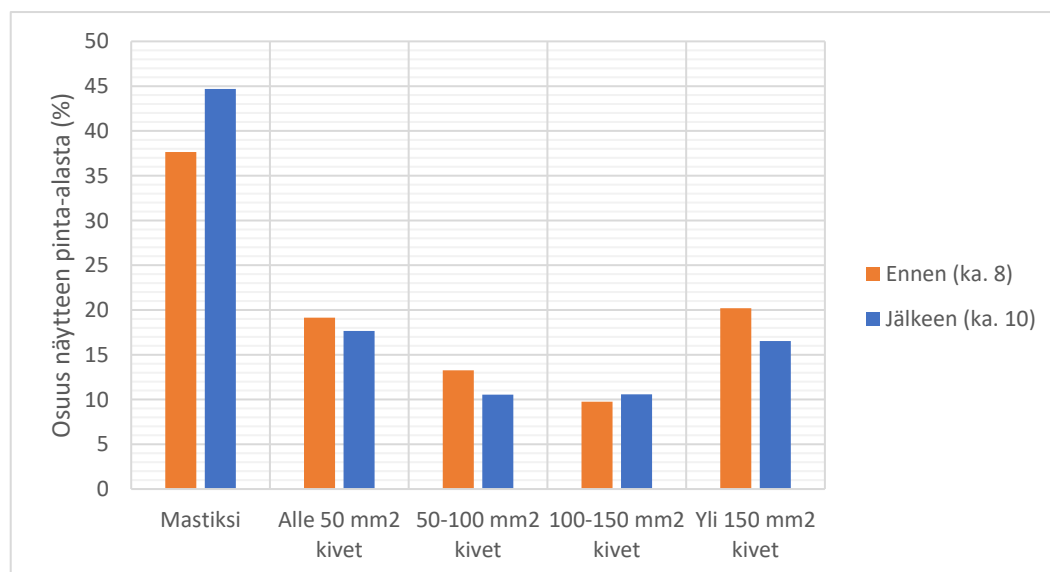
Massan B FI 0 -näytteille tehtiin kuva-analyysi myös Prall-testin jälkeen otetuista valokuvista. Kuva-analyysin tulokset ja Prall-tulokset on esitetty kuvassa 88.



Kuva 88. SMA 16 -näytteiden pinnan kuva-analyysi Prall-testin jälkeen ja Prall-tulokset massalla B FI 0.

Kuvista 86 ja 88 ilmenee, että lineaariset sovitukset pysyvät samansuuntaisina ennen testiä ja testin jälkeen tehdyissä kuva-analyysissä, joskin lineaaristen sovitusten jyrkkyydet hieman muuttuivat. Sama ilmeni myös Vimanin (2011) analysoidessa Prall-näytteiden pinnan yli 5 ja 8 mm rakeiden osuudet ennen testiä ja testin jälkeen.

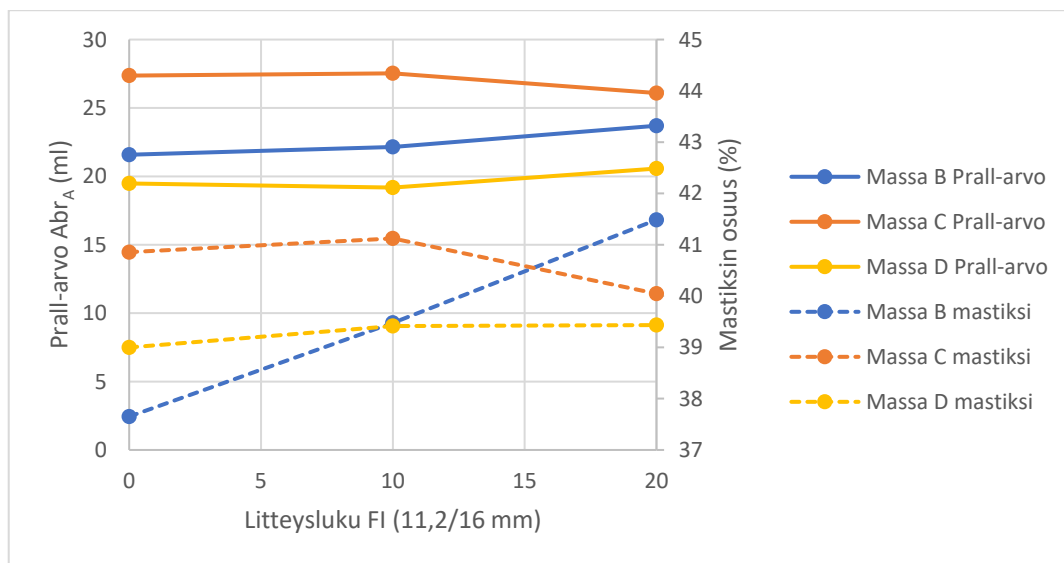
Prall-testin tuloksella on siis yhteys myös testin lopussa näytteen pinnassa olevien mastiksin, pienien ja suurien kiven osuuteen. Massan B FI 0 -näytteille ennen Prall-testiä tehdyissä analyysissä havaittiin kuitenkin olevan vahvempi yhteys pinnan koostumuksen ja Prall-arvon välillä kuin Prall-testin jälkeen tehdyissä analyysissä. Tarkastellaan vielä tarkemmin, miten näytteen pinnan koostumus muuttuu Prall-testissä. Kuvassa 89 on esitetty massan B FI 0 -tason näytteiden keskimääräiset koostumukset ennen Prall-testiä ja testin jälkeen.



Kuva 89. SMA 16 -näytteiden pinnan keskimääräinen koostumus ennen Prall-testiä ja sen jälkeen massalla B FI 0.

Kuvasta 89 ilmenee, että testin aikana massan B FI 0 -näytteissä suurin muutos tapahtui mastiksin ja suurimpien kivien osuudessa. Mastiksin osuus kasvoi keskimäärin 7 prosenttiyksikköä, kun taas yli 150 mm<sup>2</sup> kivien osuus pieneni vajaan 4 prosenttiyksikköä. Muut muutokset olivat pienempiä: testin aikana alle 50 mm<sup>2</sup> kokoisten kivien osuus pieneni noin 1,5 prosenttiyksikköä, 50–100 mm<sup>2</sup> kokoisten kivien osuus pieneni hieman alle 3 prosenttiyksikköä ja 100–150 mm<sup>2</sup> kokoisten kivien osuus suureni hieman alle 1 prosenttiyksikköä.

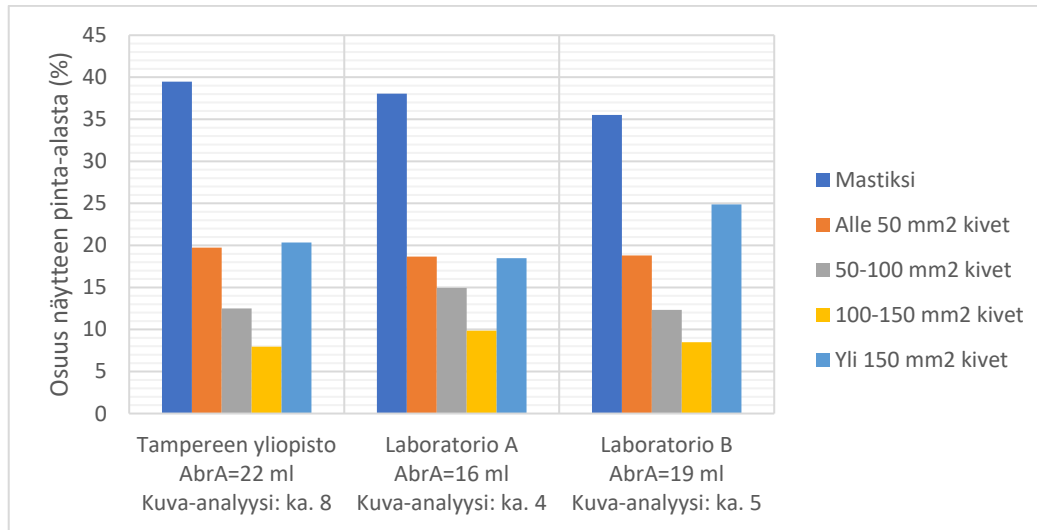
Tarkastellaan seuraavaksi litteysluvun muuttamisen vaikutusta näytteen pinnan koostumukseen. Kuvassa 90 on esitetty eri massoilla mastiksin keskimääräinen osuus näytteen pinnassa ennen testiä sekä kappaleessa 9.3 havaittu litteysluvun vaikutus Prall-arvoon.



Kuva 90. Litteysluvun muutoksen vaikutus SMA 16 -näytteen Prall-arvoon ja mastiksin osuuteen näytteen pinnassa ennen testiä.

Kuvassa 90 havaitaan, että litteysluvun muutos vaikuttaa näytteen pinnan mastiksin osuuteen eri tavoin eri massoilla: esimerkiksi massalla B litteysluvun muutoksen vaikutus mastiksin osuuteen oli suurempi kuin massoilla C ja D. Kuvasta 90 ilmenee myös, että litteysluvun muutoksen vaikutus Prall-arvoon ja mastiksin osuuteen on samankaltainen. Esimerkiksi massalla B Prall-arvo ja mastiksin osuus suurenevat melko tasaisesti litteysluvun kasvaessa, kun taas massan C litteyslukutasolla 20 Prall-arvon pienentyessä hieman myös mastiksin osuus pienenee.

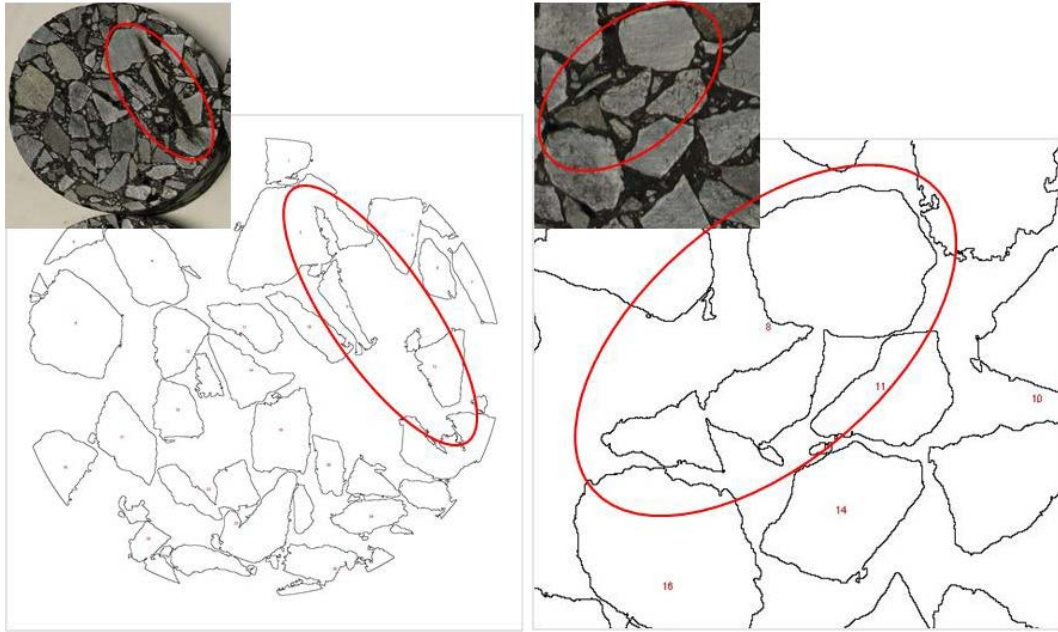
Tarkastellaan vielä eri laboratorioissa vertailtujen näytteiden pintojen kuva-analyysin tuloksia. Kuva-analyysin keskimääräiset tulokset laboratorioittain on esitetty kuvassa 91.



Kuva 91. SMA 16 -näytteiden pinnan kuva-analyysin keskimääräiset tulokset ennen testiä laboratorioittain.

Kuvasta 91 havaitaan, että näytteiden pinnan koostumuksissa ei ole selkeitä eroja, jotka selittäisivät tuloserot laboratorioiden välillä. Esimerkiksi laboratorion B näytteissä on keskimäärin vähemmän mastiksia kuin laboratorion A näytteissä, vaikka laboratorio A sai pienemmän Prall-arvon. Lisäksi yli 150 mm<sup>2</sup> kiviä on keskimäärin vähiten pienimmän Prall-arvon saaneen laboratorion A näytteissä. Toisaalta mastiksin ja alle 50 mm<sup>2</sup> kivien osuus on keskimäärin suurin yliopiston näytteissä, mikä voisi selittää yliopiston saamaa suurinta Prall-kuluman arvoa. On kuitenkin huomioitava, että kuva-analyysi tehtiin näytteiden koko pinnalle ennen testiä. Laboratorioiden välillä havaittiin näytteiden kulutuspinta-aloissa eroja, kuten kappaleessa 9.5 todettiin.

Kuva-analyysiin liittyi joitain epätarkkuuksia. Muokattaessa näytteistä otettuja kuvia mustavalkoisiksi oli tehtävä kompromisseja: mahdollisimman moni näytteen pinnan kivi tuli saada esiin, mutta ilman kivien yhdistymistä toisiinsa todellista suuremmiksi pinnoiksi. Tämä aiheutti kuva-analyysissä haasteita erityisesti näytteillä, joiden valokuvan valotus oli epätasainen. Epätarkkuutta aiheuttivat myös muutamissa kappaleissa pintaan tehdyt merkinnät sekä bitumitahrat, sillä tällöin kiviä yhdistyi toisiinsa todelliselta pinta-alaltaan suuremmiksi alueiksi. Kuva-analyysitarkastelusta poistettiin yhteensä 16 kpl näytettä, sillä niiden kuva-analyysi ei ollut tarpeeksi luotettava heikon valotuksen tai merkintöjen vuoksi. Kuvissa 92 ja 93 on esitetty esimerkkejä kuva-analyysiin epätarkkuutta aiheuttavista tekijöistä.



Kuva 92. Vasemmalla bitumitarha ja oikealla vierekkäisten kivien yhdistyminen.

Kuvassa 92 vasemman puoleisen näytteen pinnassa on bitumitarha, jonka vuoksi sen alla olevat kivet analysoitiin todellista pienemmiksi ja mastiksin osuus vastaavasti todellista suuremmaksi. Kuvassa oikealla puolella taas on esitetty kivien yhdistyminen toisiinsa: ohjelma saattoi tulkita näytteen pinnassa vierekkäiset kivet yhdeksi suureksi kiveksi, jolloin näytteen pinnasta analysoitujen eri kokoisten kivien osuudet olivat epätarkkoja. Tällaisia pienehköjä epätarkkuuksia sisältäviä näytteitä ei poistettu tarkastelusta.



Kuva 93. Näytteen valokuvan heikon valotuksen aiheuttama vääristymä.

Kuvassa 93 on esitetty näytteen kuva-analyysi, kun valokuvassa on heikko valotus. Tällöin näytteen tummemman reunan kivet tulkittiin mastiksiksi, kun taas valoisammasta reunasta kaikki kivet yhdistyivät toisiinsa yhdeksi suureksi alueeksi. Tällaiset näytteet poistettiin tarkastelusta.

## 9.7 Prall-menetelmän haasteet ja kehitysehdotukset

Tutkimuksen perusteella Prall-testin tuloksissa on runsaasti hajontaa sekä laboratorion sisällä että laboratorioden välillä laitteen Pralls-modifioinnista huolimatta. Tässä tutkimuksessa laboratoriossa valmistetusta asfalttilaatasta porattujen rinnakkaisnäytteiden tulokset poikkesivat toisistaan jopa 10 yksikköä ja laboratorioden välillä tulosten keskiarvoissa oli eroa 3–6 yksikköä. Päälysteiden laadun osoittaminen tai vaatimusten asettaminen Prall-menetelmällä voi tämän vuoksi olla haastavaa.

Suuren hajonnan vuoksi standardissa määritettyjen toistettavuuden ja uusittavuuden arvojen toteutuminen käytännössä on haastavaa. Standardissa on asetettu vain yhdet toistettavuuden ja uusittavuuden arvot kaikille massatyypeille. Esimerkiksi pohjoismaalaisessa vertailukokeessa vuonna 2016 AB 16 -näytteiden toistettavuudeksi saatiin 15 % ja uusittavuudeksi 34 %, SMA 11 -näytteiden toistettavuudeksi 14 % ja uusittavuudeksi 28 % sekä SMA 16 -näytteiden toistettavuudeksi 26 % ja uusittavuudeksi 38 % (Waldemarson ja Viman 2017). Toistettavuuden ja uusittavuuden arvot vaikuttavat siis poikkeavan jonkin verran massatyypin ja massan maksimiraekoon mukaan, ja juuri SMA 16 -näytteillä voikin olla erityisen haastava päästä standardin arvoihin.

Tarkastellaan tutkimuksessa havaittujen Prall-tulokseen vaikuttavien tekijöiden yhteisvaikutusta. Tutkimuksen perusteella hajontaa tuloksiin saattaa aiheutua näytteen tyhjätilasta ja kivipeitteisyydestä sekä laitteesta. Kaikkia näytteitä tarkasteltaessa tyhjätilan yhden prosenttiyksikön suurentuminen vaikutti suurentavan Prall-arvoa keskimäärin noin 0,8 yksikköä. Jos oletetaan rinnakkaisnäytteiden tyhjätilan vaihtelevan suurimmillaan 3 yksikön sisällä, olisi vastaava muutos Prall-arvossa 2,4 yksikköä. Vastaavasti kaikkia näytteitä tarkasteltaessa kivipeitteisyyden pienetessä 10 prosenttiyksikköä vaikutti Prall-arvo suurenevan keskimäärin noin 2,3 yksikköä. Suurimmalla osalla näytteistä pinnan kivipeitteisyys vaihtelikin juuri 10 prosenttiyksikön sisällä. Laitteiden välillä eron havaittiin olevan suurimmillaan noin 6 yksikköä, mutta standardin mukaisella kumirenkaalla saaduilla tuloksilla ero oli noin 3 yksikköä. Kun huomioidaan näytteen tyhjätilan ja kivipeitteisyyden aiheuttama ero sekä laitteiden välinen ero, voisi yhteisvaikutus Prall-arvoon olla suurimmillaan lähes 8 yksikköä. Tämä vastaa Asfalttinormien (2017) Prall-luokkien välistä eroa. Jos taas oletetaan, että rinnakkaisnäytteillä näiden kolmen muuttujan ääripäät eivät toteudu, eri tekijöiden yhteisvaikutukseksi voidaan arvioida

$$\sqrt{2,4^2 + 2,3^2 + 3^2} = 4,5$$

eli 4,5 yksikköä. Tämän lisäksi Prall-arvon hajontaan vaikuttaa vielä muitakin tekijöitä, sillä esimerkiksi näytteiden kiviainesten lujuudessa on luonnollista hajontaa.

Tässä tutkimuksessa testattiin 10 rinnakkaisnäytettä, jolloin tilastollisesti poikkeavia ääriarvoja ei löytynyt. Tyypillisen 4–5 rinnakkaisnäytteen testauksessa niitä kuitenkin saattaa tulla esiin, kuten laboratorion A tuloksissa ilmeni. Rinnakkaisnäytteiden lisääminen ei vaikuttanut pienentävän hajontaa, sillä esimerkiksi vertailulaboratoriolla A viiden näytteen keskihajonta oli samaa suuruusluokkaa



kuin yliopiston laboratorion kymmenen rinnakkaisnäytteen keskihajonnat. Standardin SFS-EN 12697-16 (2016) mukaan Prall-yksittäistuloksista lasketaan aina keskiarvo, eikä yksittäistuloksia tarkastella mahdollisten tilastollisten poikkeamien kannalta. Standardissa ei myöskään edellytetä lisänäytteiden testaamista tulosten suuren hajonnan tai poikkeamien myötä. Tilastollinen tarkastelu voisi olla hyvä keino pienentää laboratoriodien sisäistä ja välistä hajontaa. Poikkeavat tulokset voitaisiin tarkastella esimerkiksi kuulamylytestin tapaan Dixonin menetelmällä, ja mahdollisen suuren poikkeaman vuoksi voitaisiin edellyttää lisänäytteen tai -näytteiden testaamista.

Tässä tutkimuksessa näytteen pinnan kivipeitteisyydellä ja mastiksin osuudella havaittiin olevan vaikutusta Prall-arvoon. Prall-testissä testattava pinta-ala on hyvin pieni, alle 60 cm<sup>2</sup>, joten yksittäisten kivien merkitys nousee suureksi. Asfaltti on epähomogeeninen materiaali, joten Prall-näytteen pinnan kivisyydessä on aina eroja. Näytteen poraamisella sekä mahdollisella sahaamisella ja testauspuolen valinnalla voi siis olla vaikutusta Prall-testin tulokseen. Tutkimuksen perusteella sahatut näytteet olisi hyvä valokuvata ennen testiä ja testin jälkeen, jotta näytteen pinnan kivipeitteisyyden vaikutusta tuloksiin voidaan tarvittaessa arvioida. Näytteiden valokuvaus nousi tutkimuksessa esiin myös laboratoriodien välisen hajonnan arvioinnissa. Kuva-analyysin tekeminen näytteen sahatulle pinnalle oli nopeaa ja helppoa tutkimuksessa tehdyllä tarkkuudella ja käytössä olleella ohjelmalla, joten myös kuva-analyysia voisi jatkossa hyödyntää Prall-tulosten tarkastelussa. Näytteen pinnan kivipeitteisyyden vaikutuksesta tarvitaan kuitenkin lisätutkimusta, sillä tässä tutkimuksessa tutkittiin vain SMA 16 -massasta valmistettuja näytteitä. Lisäksi kuva-analyysi edellyttää, että valokuvien laatuun ja valotukseen kiinnitetään huomiota.

Tutkimuksessa oli uuden Prall<sub>5</sub>-laitteen myötä käytössä uusi kuulasarja, joten kuulasarjan massa ja kuulien koko olivat aivan standardin ylärajalla. Toisella vertailulaboratoriolla taas kuulasarjan massa oli lähellä alarajaa. Prall-menetelmän standardissa SFS-EN 12697-16 (2016) määritelty kuulasarjan massan toleranssi (265–285 g) on suhteessa suuri verrattuna esimerkiksi kuulamylytestin standardissa SFS-EN 1097-9 (2014) esitettyyn kuulasarjan massan toleranssiin (6990–7010 g). Bäckström (2017) ehdottikin opinnäytetyössään menetelmään standardia suppeampaa toleranssia (270–285 g), ja tämä voisikin vähentää eroja. Lisäksi testissä käytössä olleen kuulasarjan massa voisi olla hyvä kirjata testausselesteeseen.

Tutkimuksessa testattiin Prall-arvon määrittämistä kuivatuista näytteistä, sillä epäilyksenä oli, että näytteiden punnitseminen pintakuivattuina aiheuttaa lisää hajontaa tuloksiin. Massan B näytteet kuivattiin testin jälkeen, ja Prall-arvo laskettiin ennen testiä ja sen jälkeen kuivasta näytteestä punnittujen massojen avulla. Pintakuivasta ja kuivasta näytteestä määritetyt Prall-arvot on esitetty taulukossa 46.



*Taulukko 46. Massan B Prall-tulokset määritettynä pintakuivasta ja kuivasta näytteestä.*

Näyte	FI 0			FI 10			FI 20		
	Pinta-kuiva (ml)	Kuiva (ml)	Ero (ml)	Pinta-kuiva (ml)	Kuiva (ml)	Ero (ml)	Pinta-kuiva (ml)	Kuiva (ml)	Ero (ml)
a	20,8	21,4	+0,6	26,1	27,1	+1,0	21,4	22,0	+0,6
b	20,9	21,4	+0,5	21,2	22,1	+0,9	22,6	23,4	+0,8
c	18,4	19,0	+0,6	26,0	26,5	+0,5	23,1	23,6	+0,5
d	23,1	23,6	+0,5	17,5	18,6	+1,1	27,2	28,1	+0,9
e	23,5	24,1	+0,6	19,6	20,9	+1,3	22,5	23,2	+0,7
f	19,6	20,7	+1,1	23,2	23,7	+0,5	28,1	28,7	+0,6
g	18,6	19,3	+0,7	20,2	21,2	+1,0	25,3	25,9	+0,6
h	25,8	26,5	+0,7	22,8	23,2	+0,4	20,8	21,6	+0,8
i	19,7	21,2	+1,5	23,7	24,6	+0,9	24,0	24,8	+0,8
j	25,4	26,4	+1,0	21,2	22,2	+1,0	22,0	22,4	+0,4
<b>Keski-arvo</b>	21,6	22,4	+0,8	22,2	23,0	+0,8	23,7	24,4	+0,7
<b>Keskihajonta</b>	2,7	2,7	+0,0	2,8	2,6	-0,2	2,5	2,5	+0,0

Taulukosta 46 ilmenee, että kuivasta yksittäisnäytteestä määritetyt Prall-tulokset olivat 0,4–1,5 yksikköä suurempia ja keskimäärin noin 0,8 yksikköä suurempia kuin pintakuivasta näytteestä määritetyt tulokset. Prall-testin aikana näytteeseen vaikuttaa siis imeytyvän lisää vettä näytteen vesihautteessa vakiointiin verrattuna. Taulukosta 46 kuitenkin ilmenee, että keskihajonnat pysyivät samoina eri tavoin määritetyissä Prall-tuloksissa: ainoastaan FI 10 -näytteiden keskihajonta pieneni 0,2 yksikköä. Prall-arvon määrittäminen kuivasta näytteestä ei siis juurikaan vaikuttaisi pienentävän hajontaa. Myös pohjoismaisen vertailukokeen yhteydessä vuonna 2015 testattiin Prall-arvon määrittystä kuivamassasta, eikä kuivamäärityksessä havaittu silloin etuja (NordFoU 2015).

## 10 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tutkimus koostui kirjallisuusselvityksestä ja kokeellisesta osuudesta. Kirjallisuusselvityksessä kiviaineksen raemuodon havaittiin vaikuttavan kuulamylyarvoon, Prall-arvoon ja tiekulumaan. Kiviaineksen litteyslukua muokkaamalla 10 yksikköä kuulamylyarvon on havaittu muuttuvan suurimmillaan hieman alle 3 yksikköä. Kiviaineksen muodon vaikutus kuulamylyarvoon on havaittu kuitenkin olevan erilainen eri kivilajityypeillä johtuen esimerkiksi kiviaineksen lujuudesta ja suuntautuneisuudesta. Kiviaineksen muodon on myös havaittu vaikuttavan päällysteen nastarengaskulumiseen: litteysluvun 10 yksikön suurentaminen on suurentanut Prall-arvoa hieman alle 2 yksikköä ja minikoetiellä vastaavan muutoksen myötä kolmen talven nastarengaskulumaa on suurentunut noin 1 mm. Kirjallisuusselvityksessä kuitenkin ilmeni, että saman kiviaineksen muodon muokkaaminen saattaa vaikuttaa eri verran eri nastarengaskulumista kuvaaviin parametreihin eli kuulamylyarvoon, Prall-arvoon ja tiekulumaan.

Kirjallisuusselvitykseen koottiin myös päällysteen nastarengaskulumista simuloivien laboratoriomenetelmien kehitys. Aiemmin Suomessa nastarengaskulumista on simuloitu SRK-menetelmällä, mutta Ruotsissa käytössä ollut Prall-menetelmä vakiintui käyttöön myös Suomessa jo 2000-luvun alkupuolella. Molempien menetelmien haasteena on ollut sekä samassa laboratoriossa että eri laboratorioissa saatavien tulosten suuri hajonta, ja erojen suuruutta ja niiden aiheuttajia on pyritty selvittämään vertailukokeilla. Eroja on pyritty vähentämään muun muassa tarkentamalla menetelmäkuvausta, mutta edelleen vuoden 2016 standardipäivityksen jälkeen Prall-menetelmän toistettavuudessa ja uusittavuudessa on havaittu olevan haasteita.

Tutkimuksen kokeellisessa osassa tehtiin yhteensä 100 Prall-testiä näytteille, jotka valmistettiin laboratoriossa SMA 16 -massasta. Näytteissä karkeana kiviaineksena käytettiin kolmen eri louhoksen kiviainesta kolmella eri litteyslukutasolla. Näistä 90 näytettä tutkittiin Tampereen yliopiston laboratoriossa uudella modifioidulla Prall<sub>s</sub>-laitteella. Lisäksi kahdessa muussa suomalaisessa asfalttilaboratoriossa tutkittiin 5 näytettä vastaavilla laitteilla. Tavoitteena oli tutkia kiviaineksen kuulamylyarvon, litteysluvun ja murskausprosessin vaikutusta Prall-arvoon ja ohella selvittää myös Prall-menetelmän laboratorion sisäistä toistettavuutta ja laboratorioiden välistä uusittavuutta.

Kirjallisuusselvityksessä Prall-arvon havaittiin korreloivan näytteen karkean kiviaineksen kuulamylyarvon kanssa, ja tämä ilmeni myös tutkimuksen näytteillä. Tutkimuksessa 11,2/16 mm kiviaineksen kuulamylyarvon suurentaminen kolmella yksiköllä suurensi Prall-arvoa noin 4 yksikköä. Laskennallisen Prall-arvon kaavan havaittiin kuulamylytasolla  $A_{N7}$  antavan lähes saman tuloksen kuin Tampereen yliopistossa tutkituilla näytteillä, kun taas kuulamylytasolla  $A_{N10}$  kaavan havaittiin yliarvioivan kulumaa noin 3 yksikköä tutkittuihin näytteisiin verrattuna.

Asfalttimassan karkean kiviaineksen litteysluvun muokkaamisella ei havaittu olevan selkeää vaikutusta Prall-arvoon. Kahden louhoksen kiviaineksesta valmistettujen näytteiden Prall-arvo kasvoi hieman litteysluvun kasvaessa, kun taas yhden louhoksen kiviaineksesta valmistetuilla näytteillä Prall-arvo pieneni hieman. Kunkin louhoksen kiviaineksista valmistettujen Prall-näytteiden kes-

kiarvo pysyi kuitenkin 1,4–2,1 yksikön sisällä, kun litteyslukua muokattiin 20 yksikköä. Tutkimuksen perusteella kiviaineksen litteyslukua modifioitaessa kuulamyllyarvo saattaa muuttua hieman enemmän kuin Prall-arvo. Tämä ei kuitenkaan suoraan tarkoita, että kiviaineksen muoto-ominaisuuksia parantamalla, esimerkiksi kubisoinnilla, kuulamyllyarvo paranisi enemmän kuin valmiin päällysteen kulumiskestävyys. Tutkimuksen kolmesta massasta kahdessa oli kubi-soitua karkeaa kiviainesta. Kubisoiduista kiviaineksista valmistetuissa massoissa litteysluvun muokkaamisella oli samantyyppinen vaikutus sekä kuulamyllyarvoon että Prall-arvoon, kun taas kubisoimattomasta kiviaineksesta valmistetulla massalla erityyppinen. Lisäksi kubisoinnin arvioinnissa on huomiotava, että sillä voidaan vaikuttaa vain rajoitetusti kuulamyllyarvoon ja esimerkiksi muokata kuulamyllyluokan rajalla olevasta kiviaineksesta seuraavaan kuulamyllyluokkaan soveltuvaa asfalttikiviainesta. Tämä voi mahdollistaa esimerkiksi paikallisen kiviaineksen hyödyntämisen päällystyskohteessa kauempaa tuotavan kiviaineksen sijaan. Kiviaineksen muoto-ominaisuuksia parantamalla voidaan myös parantaa epäsuorasti päällysteen nastarengaskulumiskestävyyttä, sillä esimerkiksi hyvämuotoisella kiviaineksella asfalttimassan tiivistettyys paranee ja samalla päällysteen tyhjätila pienenee.

Aiemmissa tutkimuksissa Prall-menetelmän laboratorion sisäinen hajonta ja toistettavuus olivat havaittu suuriksi, ja sama ilmeni myös tässä tutkimuksessa. Tampereen yliopistossa saman massan 10 rinnakkaisnäytteen Prall-tulokset vaihtelivat noin 4–10 yksikköä ja massakohtainen keskihajonta oli 1,4–3,4 yksikköä. Laboratorion sisäinen toistettavuus oli keskimäärin noin 31 %. Standardissa SFS-EN 12697-16 (2016) on määritetty Prall-menetelmän toistettavuudeksi 15 %, minkä tutkimuksen tulokset ylittivät huomattavasti. Tutkimuksessa näytteen pinnan kivipeitteisyyden havaittiin vaikuttavan Prall-tulokseen: mitä enemmän näytteen pinnassa on mastiksia ja pieniä kiviä, sitä enemmän näytteen havaittiin kuluvan Prall-testissä. Vastaavasti näytteen, jonka pinnassa on paljon suuria kiviä, havaittiin kuluvan vähemmän. Näytteiden ollessa epähomogeenista asfalttia on niiden pinnan kivisyydessä väistämättäkin aina eroja. Tutkimuksen perusteella näytteet olisivatkin hyvä valokuvata ennen testiä ja testin jälkeen, jotta näytteen pinnan kivipeitteisyyden vaikutusta tuloksiin voitaisiin tarvittaessa arvioida. Mahdollisesti myös kuva-analyysia voitaisiin jatkossa hyödyntää Prall-tulosten tarkastelussa. Pinnan kivipeitteisyyden lisäksi tutkimuksessa havaittiin, että näytteen tyhjätila saattaa vaikuttaa Prall-arvoon: mitä suurempi oli näytteen tyhjätila, sitä enemmän näyte vaikutti kuluvan testissä. Erityisesti tämä ilmeni tutkimuksessa litteyslukutason FI 20 näytteillä, jolloin näytteen tyhjätilan kasvaessa yhdellä prosenttiyksiköllä Prall-arvo vaikutti suurenevan keskimäärin noin 2,5 yksikköä.

Prall-tuloksia vertailtiin myös kolmen asfalttilaboratorion modifioitujen Prall<sub>5</sub>-laitteiden välillä. Laboratorioiden välillä Prall-keskiarvoissa oli 3–6 yksikköä eroa ja laboratorioiden välinen keskihajonta oli 3,3 yksikköä. Laboratorioiden välisen hajonnan havaittiin siis olevan suuri laitteiden modifioinnista huolimatta. Laboratorioiden välisillä vertailunäytteillä Prall-menetelmän toistettavuudeksi saatiin 22 % ja uusittavuudeksi 53 %. Standardissa SFS-EN 12697-16 (2016) toistettavuudeksi on määritetty 15 % ja uusittavuudeksi 27 %, joten tutkimuksessa standardin arvot ylittyivät huomattavasti. Tutkimuksessa näytteiden testissä kulutetun pinnan suuruudessa havaittiin vaihtelua laboratorioiden välillä, joten kulutuspintojen yhtenäistäminen voisi pienentää laboratorioiden välisiä tulose-

roja. Prall-laitteen osissa ja toiminnassa on kuitenkin paljon muitakin yksityiskohtia, jotka voivat vaikuttaa laitteen tulostasoon. Eri laboratorioden Prall-laitteiden välisten tuloserojen syiden selvittämistä on siis syytä edelleen jatkaa.

Tutkimuksen perusteella näytekappaleella ja laboratoriolle on siis vaikutusta Prall-tulokseen. Prall-tulosten hajonnan taustalla olevilla tekijöillä, kuten näytteen tyhjätilalla ja mastiksin määrällä, on vaikutusta myös päällysteen kulumiskestävyyteen tiellä. Päällysteen laadun osoittaminen tai vaatimuksen asettaminen Prall-menetelmällä voi kuitenkin olla haastavaa, sillä laboratorion sisäinen hajonta ja laboratorioden välinen hajonta ovat suuria. Lisäksi nykyisin käytössä olevat Prall-arvon poikkeamaan pohjautuvat tienpäällystysurakoiden yleiset arvonmuutosperusteet vaikuttavat hyvin tiukoilta, kun otetaan huomioon tulosten suuri vaihtelu. Tutkimuksessa ei havaittu etua näytemäärän mahdollisella kasvattamisella nykyistä suuremmaksi. Sen sijaan Prall-menetelmään voisi myös lisätä tulosten tilastollisesti poikkeavien ääriarvojen tarkastelun esimerkiksi Dixonin menetelmällä. Suurien poikkeamien myötä ääriarvot saaneet näytteet voitaisiin poistaa tarkastelusta ja testata lisänäytteitä. Tämä voisi pienentää hajontaa niin laboratorion sisällä kuin niiden välilläkin.

Tutkimuksessa kiviaineksen muodon ei havaittu vaikuttavan juurikaan päällysteen nastarengaskulumiskestävyyteen Prall-menetelmällä mitattaessa. Kirjallisuusselvityksen perusteella kiviaineksen muodolla kuitenkin on vaikutusta päällysteen nastarengaskulumiseen, joten jatkossa kiviaineksen muodon ja kuulumyllyarvon vaikutusta kulumaan voisikin tutkia esimerkiksi minikoetiejärjestelyin. Minikoetiejärjestelyä on käytetty tiekuluman mittaamisessa aiemmin ainakin Suomessa ja Ruotsissa. Minikoetiellä uuteen päällysteeseen jyrsitään ura, johon kiinnitetään laboratoriossa valmistetut päällystelaatat (noin 50 x 80 x 5 cm) ja laatan kulumaa mitataan ennen ja jälkeen nastarengaskausion. Minikoetiellä voisi tutkia esimerkiksi SMA- ja AB-päällysteitä, joihin vaihdettaisiin kuulamylyluokkien  $A_{N7}$  ja  $A_{N10}$  kiviaineksiä litteyslukutasoilla 0, 10 ja 20.

## Lähteet

- Alaska Department of Transportation and Public Facilities (2016). [Alaska Test Methods Manual](#).
- Alkio, R. & Vuorinen, J. (1999). [Kiviaineksen välilajitteen raemuodon vaikutus päällysteen ominaisuuksiin](#). Tielaitoksen selvityksiä 37/1999. Tiehallinto, Tie- ja liikennetekniikka. Helsinki.
- Alkio, R. (2001). [Prall- ja SRK-menetelmien vertailtavuus minikoetiekulumiin](#). Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 29/2001. Tiehallinto, tie- ja liikennetekniikka. Helsinki.
- Anastasio, S., Patricia, A., Fortes, P. & Hoff, I. (2017). [Effect of aggregate petrology on the durability of asphalt pavements](#). Construction and Building Materials 146 (2017), 652–657.
- Anderson, C. (2016). [P-vakter kan få bötfälla dubbfuskare](#). Mitt i Stockholm 12.9.2016. Viitattu 8.1.2020.
- Arrojo, M. (2000). [Pavement wear caused by the use of studded tyres](#). VTI notat 6A-2000. Statens väg- och trafikinstitut (VTI).
- Asfalttinormien 2000 muutokset: Lisälehti 2003 (2002). PANK ry. Helsinki.
- Asfalttinormit 1994 (1993). PANK ry. Helsinki.
- Asfalttinormit 2008 (2008). PANK ry. Helsinki.
- Asfalttinormit 2017 (2017). PANK ry. Helsinki.
- ASTO-loppuraportti (1993). Asfalttipäällysteiden tutkimusohjelma 1987–1992. Espoo.
- Bahadori, A., Li, X., Zhang, K. & Muhunthan, B. (2018). [Development of Asphalt Materials to Mitigate Studded Tire Wear of Pavement](#). Final Report. Pacific Northwest Transportation Consortium (PacTrans).
- Bäckström, E. (2017). [Prall-laitteiston kehittäminen](#). Hämeen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Hämeenlinna.
- ELY-keskus (2018). [Urakkakohtaiset arvonmuutosperusteet](#). Tienpäällystysurakka xx 2019. Saatavissa: <https://asiointi.dhj.fi/aineistot> > Julkiset aineistot > 5. Vuoden 2019 tarjouspyyntöasiakirjat - yhteinen osa > 19\_6\_DHJ\_Urakkakohtaiset\_arvonmuutosperusteet.
- Erichsen, E., Ulvik, A., Vongraven, H., Tangstad, R. & Fossan, B. (2010). [Miljøvennlige vegdekker – Materialtekniske egenskaper for ulike testfraksjoner](#). NGU Rapport 2010.065. Norges geologiske undersøkelse.
- Finnpool. Arbocel-kuitujen käyttö asfalttipäällysteissä.
- Forstén, L. (2017). [Rapport från Finland. Metoder, som vi diskuterar i Finland](#). Metoddagen 2017. Esitys 9.2.2017.
- Gartin, R. & Saboundjian, S. (2005). [Development and Validation of Urban Alaskan Pavement Rutting Models](#). Alaska Department of Transportation & Public Facilities. Research and Technology Transfer. FHWA-AK-RD-04-02.
- Gorski, P. (2010). [Vidareutveckling av Prallmetoden](#). SBUF-projekt. Skanska Sverige AB.

- Gustafsson, M. & Eriksson, O. (2015). [Emission of inhalable particles from studded tyre wear of road pavements](#). A comparative study. VTI rapport 867A. Statens väg- och trafikinstitut (VTI).
- Göransson, N., Viman, L. & Eriksson, E. (2018). [Avnöttningsbeständighet för högkvalitativa slitlagerbeläggningar](#). Slitagemätningar i VTI:s provvägsmaskin (PVM) och jämförelser med laboratorietester enligt Prall. VTI notat 27-2016. Statens väg- och trafikinstitut (VTI).
- Heikkinen, H. (2012). [Nastarenkaiden vaikutus päällysteiden kulumiseen taajamanopeuksissa](#). Licensiaatintyö. Aalto-yliopisto.
- Hietala, N. & Kuula, P. (2019). [Asfalttikiviaineksen raemuodon ja murskaustavan vaikutus kuulamylläryarvoon](#). Väyläviraston tutkimuksia 15/2019. Väylävirasto. Helsinki.
- Hoseth, S. (2019). [Ringanalyser asfalt ITSr, Prall og WT](#). Metodedagen, Oslo, 23.01.2019.
- Jacobson, T. (1992). [Asfaltbeläggningars nötningsegenskaper. Försök i VTI:s provvägsmaskin och laboratorieprovning enligt Tröger och PWR](#). Statens väg- och trafikinstitut (VTI). VTI notat.
- Jacobson, T. (1994). [Undersökning av asfaltbeläggningars resistens mot dubbade däck. Försök med provplattor i vägen och VTI:s provvägsmaskin](#). VTI särtryck Nr 224/1994. Statens väg- och trafikinstitut (VTI).
- Jacobson, T. & Viman, L. (1996). [Funktionsrelaterad metod för bestämning av nöttningsresistensen hos asfaltbeläggningar Laboratoriemetod – Prall](#). VTI notat 16-1996. Statens väg- och trafikinstitut (VTI).
- Jacobson, T. & Viman, L. (1998). [Modifiering av Prallmetoden och nordisk ringanalys](#). VTI notat 58-1998. Statens väg- och trafikinstitut (VTI).
- Jacobson, T. & Wågberg, L. (2007). [Utveckling och uppgradering av prognosmodell för beläggningsslitage från dubbade däck samt en kunskapsöversikt över inverkan faktorer](#). Version 3.2.03. VTI notat 7-2007. Statens väg- och trafikinstitut (VTI).
- Laaksonen, R., Laukkanen, K. & Alkio, R. (2008). [Päällysteen laadun testaus- ja mittausmenetelmien tarkkuus. Vaihe 1: Esiselvitys](#). Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 46/2008. Tiehallinto. Helsinki.
- Laitinen, V. (2020). Haastattelu sähköpostitse.
- Lampinen, A. (1993). Kestopäällysteiden urautuminen. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Julkaisuja - Publikationer, No. 781. Espoo.
- Lemminkäinen Oy (2017). Asfalttirakenteiden suunnittelun käsikirja.
- Lerfald, B. (2007). [Miljøvennlige vegdekker. Testing av deformasjonsegenskaper \(wheel-track\) og slitasjeegenskaper \(Prall\) av forsøksdekker lagt i Trolle i 2005](#). SINTEF Byggforsk. Veg- og jernbaneteknikk. SBF IN A07015.
- Liikenne- ja viestintäministeriö (2008). [Vierintämelun vähentäminen. VIEME-tutkimus- ja kehittämishankkeen loppuraportti](#). Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 4/2008. Helsinki.
- [Liikenne- ja viestintäministeriön asetus ajoneuvon renkaiden nastoista annettun liikenne- ja viestintäministeriön asetuksen muuttamisesta](#) 466/2009 (2009).

- Liikennevirasto (2018). [Tierakenteen suunnittelu. 28.11.2018](#). Liikenneviraston ohjeita 38/2018. Helsinki.
- Lundberg, J., Janhäll, S., Gustafsson, M. & Erlingsson, S. (2019). [Calibration of the Swedish studded tyre abrasion wear prediction model with implication for the NORTRIP road dust emission model](#). International Journal of Pavement Engineering.
- Kal Tire (2020). [Deflating myths about studded winter tires](#). Viitattu 21.1.2020.
- Kelkka, M., Hyyppä, I., Raitanen, N. Valtonen, J. & Sainio, P. (2003). Hiljaiset päällysteet – Tuotevaatimukset ja mittarit. Helsinki University of Technology Publications in Highway Engineering. Teknillisen korkeakoulun tielaboratorion julkaisu. TKK-TIE-A55. Espoo.
- Kinnunen, V. (2019). [Kiviaineksen laatu. Vertailukokeiden järjestäminen ja tulosten arviointi](#). Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu.
- Kollanen, T. (1995). [Laatuvastuukriteerien määrittäminen laatuvastuurakentamista varten](#). Tielaitoksen selvityksiä 59/1995. Tielaitos. Helsinki.
- Kurki, T., Manninen, E. & Saarinen, I. (1992). Asfalttipäällysteiden tutkimusohjelma ASTO 1987-1992. Asfalttipäällysteen kuluminen: osa 1. Espoo.
- Kurki, T. (1998). [Asfalttipäällysteiden urautumisen mallintaminen. ASTO-kokeiden tulosten 1990-1997 analysointi](#). Tielaitoksen selvityksiä 13/1998. Tiehallinto, Tie- ja liikennetekniikka. Helsinki.
- Kuula, P. (2015). [Tien ja radan sitomattomissa](#) rakennekerroksissa käytettävien kiviainesten lujuuden ja hienontumisen tutkiminen. Kirjallisuusselvitys. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 68/2015. Liikennevirasto. Helsinki.
- Maanteeamet (2015). [Asfadiist katendikihtide ehitamise juhis. Kinnitatud Maanteeameti peadirektori](#). 23.12.2015. a käskkirjaga nr 0314. Tallinn.
- Mannonen, T. (1992). [SRK-laitteen hyväksikäyttö Turun tiepiirissä](#). Insinööritö. Tielaitos. Turun tiepiiri. Turku.
- Mustonen, H. (2019). [Determining the Road Wear Limits in the Type Approval of Studded Tires](#). Master's Thesis. Aalto-yliopisto. Espoo.
- Niemeläinen, K. (1994). [Päällysteiden kulutuskestävyyttä mittaavien sivurullakulutuslaitteiden vertailututkimus](#). Tielaitoksen selvityksiä 16/1994. Tielaitos. Helsinki.
- NordFoU (2015). [Development of the Prall -test method in a Nordic perspective](#). EN 12697-16, Method A. Final Report. Saatavissa:
- Oslo kommune. [Piggdekkgebyr](#). Viitattu 7.1.2020.
- PANK ry (1995a). [PANK-4003. Massan valmistus laboratoriossa](#). 3.8.1995.
- PANK ry (1995b). [PANK-4210. Kuluminen](#), Tröger. 15.6.1995.
- PANK ry (2003). [Toimintakertomus 2003](#).
- PANK ry (2004a). [Asfalttinormitoimikunnan kokous 3/2004. Pöytäkirja](#).
- PANK ry (2004b). [Asfalttinormitoimikunnan kokous 4/2004. Pöytäkirja](#).
- PANK ry (2004c). [Asfalttinormitoimikunnan kokous 5/2004. Pöytäkirja](#).
- PANK ry (2005). [Toimintakertomus 2005](#).

- PANK ry (2007a). [Asfalttinormitoimikunnan kokous 1/2007. Pöytäkirja](#).
- PANK ry (2007b). [Asfalttinormitoimikunnan kokous 3/2007. Pöytäkirja](#).
- PANK ry (2007c). [Asfalttinormitoimikunnan kokous 4/2007. Pöytäkirja](#).
- PANK ry (2013). [Asfalttialan oppimateriaali ASKO. Osa 8: Tiivistys](#), versio 2013.
- Pellinen, T. & Makowska, M. (2016). [Development of Specifications and Guidelines for Hot in-Place Recycling in Finland—Outline and Framework](#). 8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials. RILEM Bookseries, vol 11, pp 851–862.
- Rise, T. & Brcic, H. (2013). Laboratorietesting. Rapport for Statens vegvesens etatsprogram Varige veger. SBF2013 F0105 – Fortolig. SINTEF Byggforsk.
- ROADEXa. E-Learning: 1. [Mitä on pysyvä muodonmuutos ja miksi sitä pitää välttää](#). Viitattu 21.1.2020.
- ROADEXb. [E-Learning: 3. Pysyvät muodonmuutokset, urautumisen luokittelu](#). Viitattu 21.1.2020.
- Robertsen, J. (2018). [Bruk av svak tilslag i asfaltdekker](#). Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. NTNU.
- RT 98-11213 (2016). Ajoneuvojen mittoja. Rakennustietosäätiö.
- Saarin, J. (2019). [Kuminasta – suomalainen innovaatio Continental-uutuusrenkaan keihäänkärkenä](#). 14.2.2019. Moottori. Viitattu 7.1.2020.
- SFS-EN 933-1 (2012). Kiviainesten geometrinen ominaisuuksien testaus. Osa 1. Rakeisuuden määrittäminen. Seulontamenetelmä.
- SFS-EN 933-3 (2012). Kiviainesten geometrinen ominaisuuksien testaus. Osa 3. Raemuodon määrittäminen. Litteysluku.
- SFS-EN 1097-9 (2014). Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 9: Nastarengaskulutuskestävyyden määrittäminen. Pohjoismainen testi (kuulamylymenetelmä).
- SFS-EN 12697-5 (2019). Bituminous mixtures. Test methods. Part 5: Determination of the maximum density.
- SFS-EN 12697-6 (2012). Asfalttimassat. Testausmenetelmät. Osa 6: Asfalttinäytteen kappaletiheyden määrittäminen
- SFS-EN 12697-16 (2004). Asfalttimassat. Testausmenetelmät. Osa 16: Nastarengaskuluminen. Kumottu 15.4.2016.
- SFS-EN 12697-16 (2016). Asfalttimassat. Testausmenetelmät. Osa 16: Nastarengaskuluminen.
- SFS-EN 12697-30 (2019). Bituminous mixtures. Test methods. Part 30: Specimen preparation by impact compactor.
- SFS-EN 12697-35 (2016). Bituminous mixtures. Test methods. Part 35: Laboratory mixing.
- SFS EN 13108-1 (2016). Asfalttimassat. Materiaalivaatimukset. Osa 1: Asfaltti-  
betoni.
- SFS EN 13108-20 (2006). Asfalttimassat. Materiaalivaatimukset. Osa 20. Tyypitestausta.



- Siebert, D. & Mork, H. (2016). [Prall tests to study the effect of mortar on the wear of Norwegian asphalt mixtures](#). E&E Congress 2016. 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress. 1-3.6.2016. Prague, Czech Republic.
- Similä, S. (2018). [Päällysteen kulumiskestävyyden määrittäminen, Prall –testi](#), SFS-EN 12697-16 A. PANK –Menetelmäpäivä 2018. Sami Similä, Mitta Oy
- Similä, S. (2020). Haastattelu sähköpostitse.
- Sorri, E. (2019). [Kiviaineksen murskausprosessi](#). Väylämateriaalit-koulutus 19.11.2019.
- Statens vegvesen (2014). [Vegbygging. Håndbok N200](#). Vegdirektoratet.
- Statens vegvesen (2018). [Vegbygging. Håndbok N200](#). Vegdirektoratet.
- Tiehallinto (2001). [Tarjousten vertailumallin kehittäminen. Päällysteiden kulumiskestävyyden vertailu](#). Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 22/2001. Helsinki.
- Tiehallinto (2002). [Päällysteet. Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset. Toteuttamisvaiheen ohjaus](#). Helsinki.
- [Tieliikennelaki 729/2018](#) (2018).
- Toiskallio, K. (2013). [Norjan ja Ruotsin suurimpien kaupunkien nastarengas-rajoitukset](#) (NASTA-tutkimusohjelman loppuraportin liite).
- Trafikverket (2011). TRVK Väg. [Trafikverkets tekniska krav Vägkonstruktion](#). TRV 2011:072. TDOK 2011:264.
- Trafikverket (2017). Krav. Bitumenbundna lager. TDOK 2013:0529. Version 3.0.
- Tuomala, A. (2020). Henkilökohtainen kuva-arkisto.
- Unhola, T. (2004). [Nastarenkaiden kuluttavuus. Ajoneuvotekijöiden vaikutus. Yliajokoe 2004](#). Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 72/2004. Liikenne- ja viestintäministeriö. Helsinki.
- Unhola, T. (2015) [Yliajokoe – Selvitys kokeen kehitysvaiheista ja tyyppi-hyväksyntärajojen määräytymisperusteista](#). Trafin julkaisuja 8/2015. Liikenteen turvallisuusvirasto (Trafi).
- Uthus, N. (2016). Varige Veier: Vurdering av resultater fra testing med Wheel Track og Prall. Tekniskt notat. Veiteknisk Institutt.
- Vegagerðin (2020). [Efnisrannsóknir og efniskröfur](#). Kafli 6 Slitlag (janúar 2020).
- Viman, L. (2011). [Utveckling av Prallmetoden](#). VTI notat 22-2010. Statens väg- och trafikinstitut (VTI).
- Viman, L. & Hakim, H. (2010). Ringanalys på Prallmetoden (Utförd 2007 på utborrade prover från väg). Statistik utvärdering. VTI utlåtande 759. Statens väg- och trafikinstitut (VTI).
- Virtala, P., Huuskonen-Snicker, E. & Alanaatu, P. (2019). [Tien urautuminen ke-sällä ja talvella 2017-2019. Väliraportti 1](#). Väyläviraston tutkimuksia 23/2019. Väylävirasto. Helsinki.
- Vuorinen, J., Kurki, T. & Alkio, R. (1998). [Kiviaineksen raemuodon vaikutus SMA-päällysteen kulumiskestävyyteen: loppuraportti Vt 1:n minikoeteiden tutkimuk-sista](#). Tielaitoksen selvityksiä 37/1998. Tielaitos. Helsinki.
- Vuorinen, J. (2000). [Kuulamyly- ja Micro-Deval-kokeiden tulosten vastaavuus](#). Tielaitoksen selvityksiä 30/1999. Tielaitos. Helsinki.

Väylä (2019). [Kielto- ja rajoitusmerkit 1.6.2020](#). Viitattu 8.1.2020.

Waldemarson, A. & Viman, L. (2017). [Provningjämförelse. Prall-metoden EN 12697-16:2016](#). VTI notat 8-2017. Statens väg- och trafikinstitut (VTI).

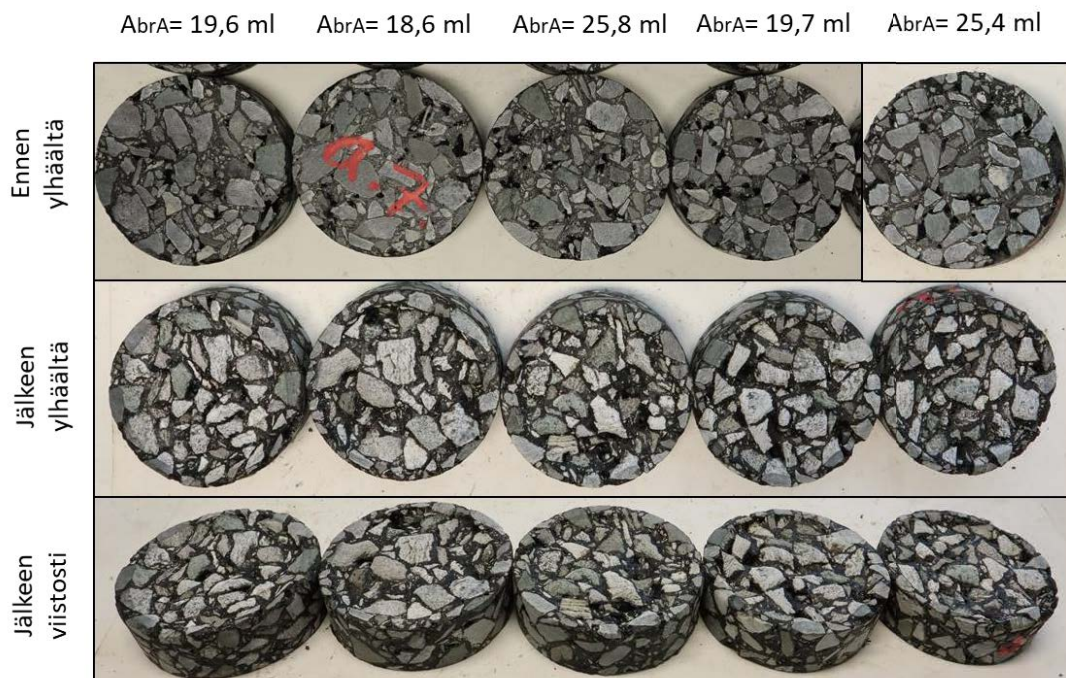
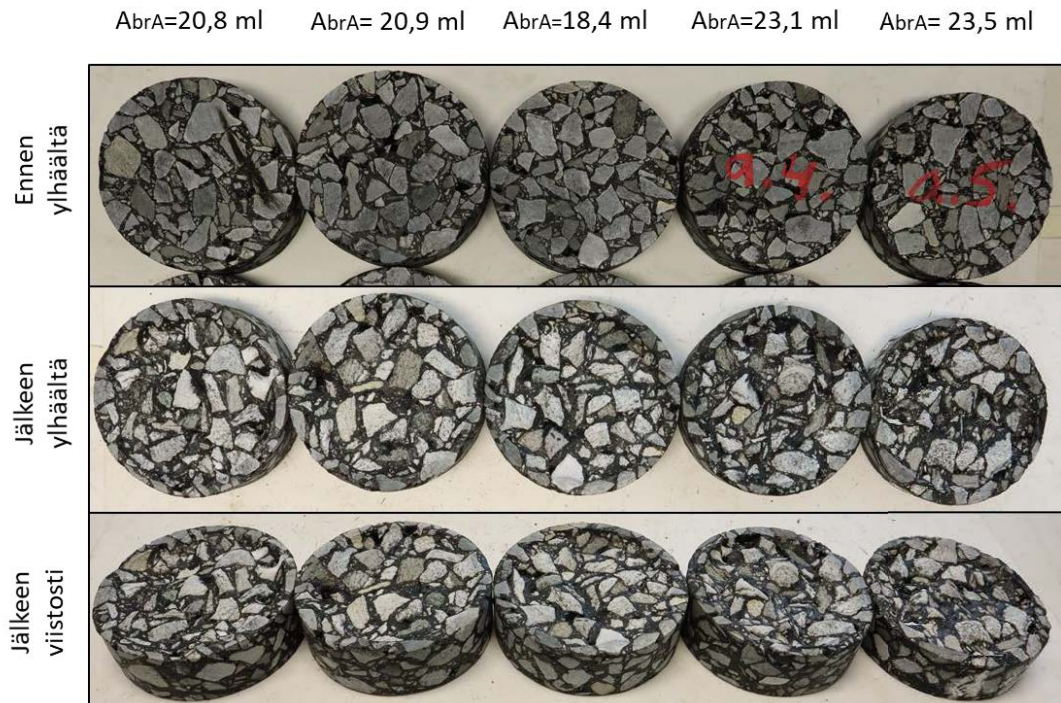
Waldemarson, A. (2018). [Svenska erfarenheter med Prall](#). NAMet-seminarium, Oslo 2018.

Wen, H. & Bhusal, S. (2014). [Toward Development of Asphaltic Materials to Resist Studded Tire Wear](#). Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2446, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2014, pp. 78–88.

Wågberg, L. & Hjalmarsson, S. (1989). [Asfaltbeläggnings nőtningssresistens](#). VTI notat V 107. Statens väg- och trafikinstitut (VTI).

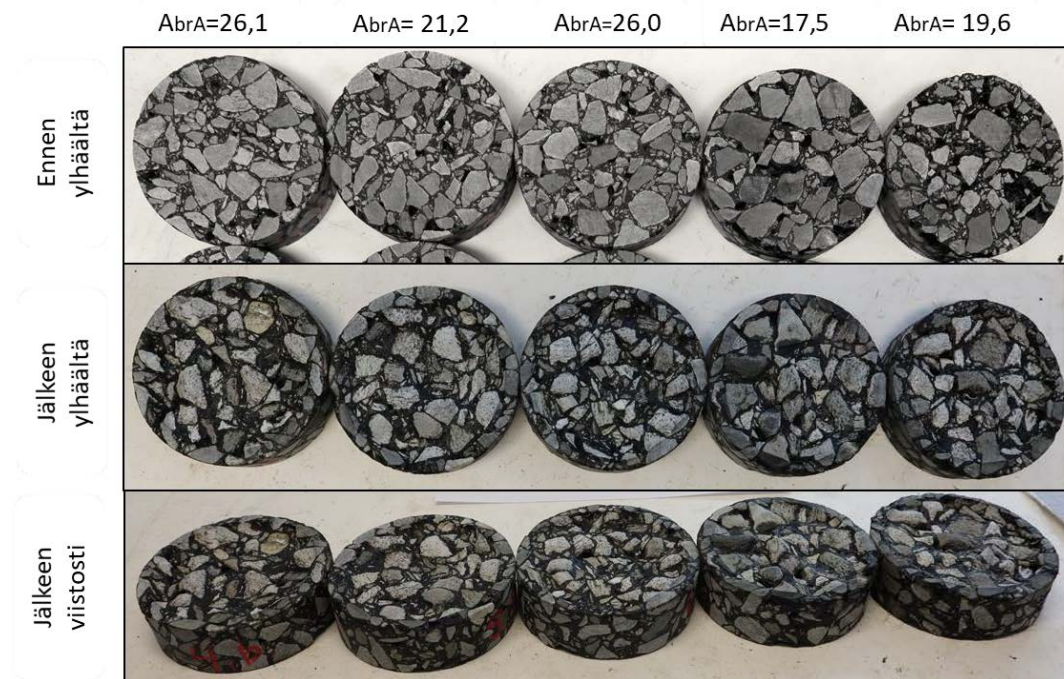
## Valokuvat näytteistä

Massa B FI 0



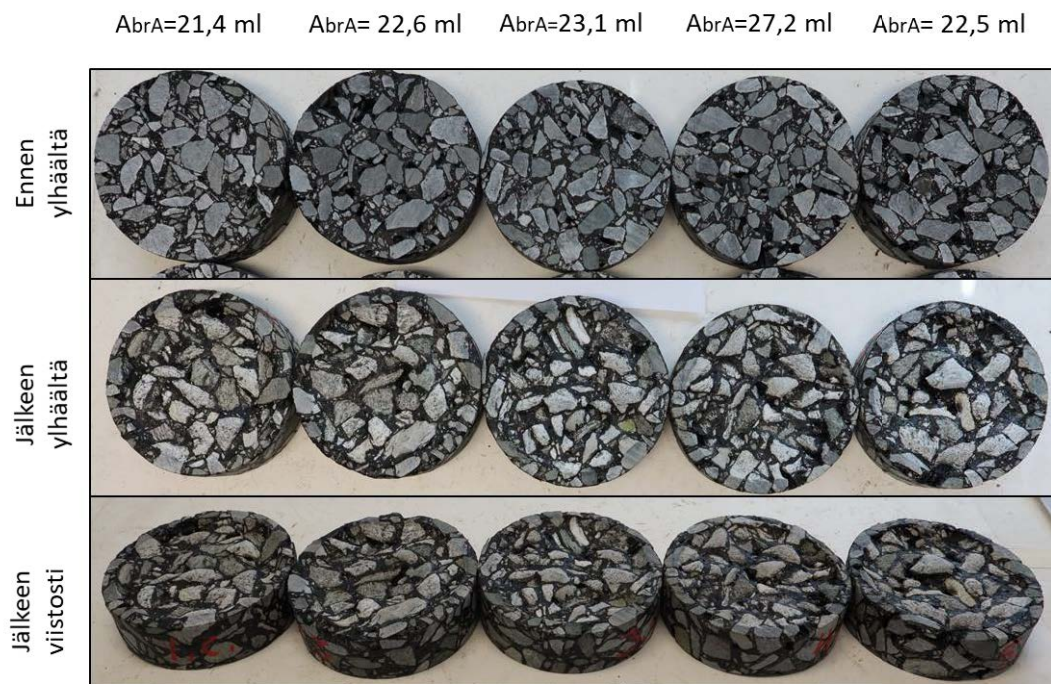


## Massa B FI 10



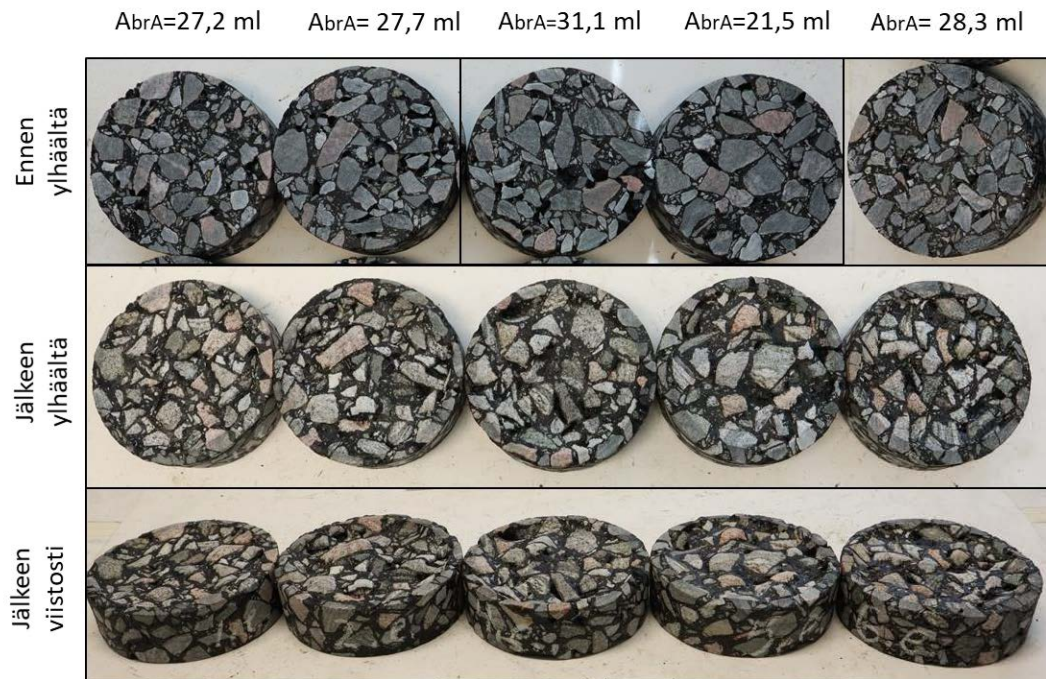


## Massa B FI 20



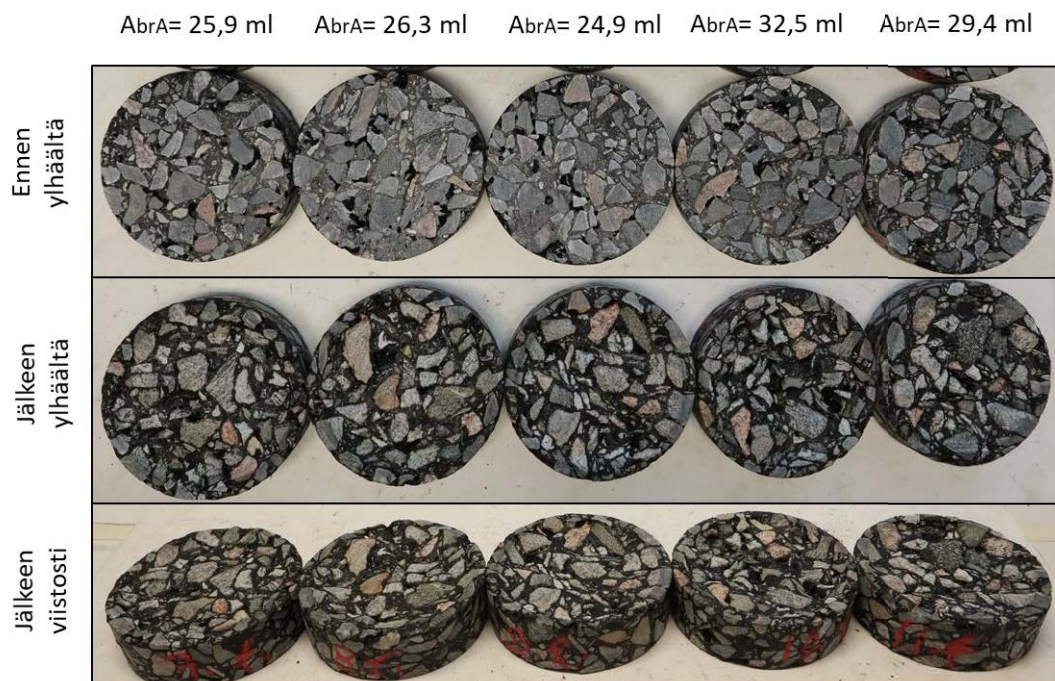
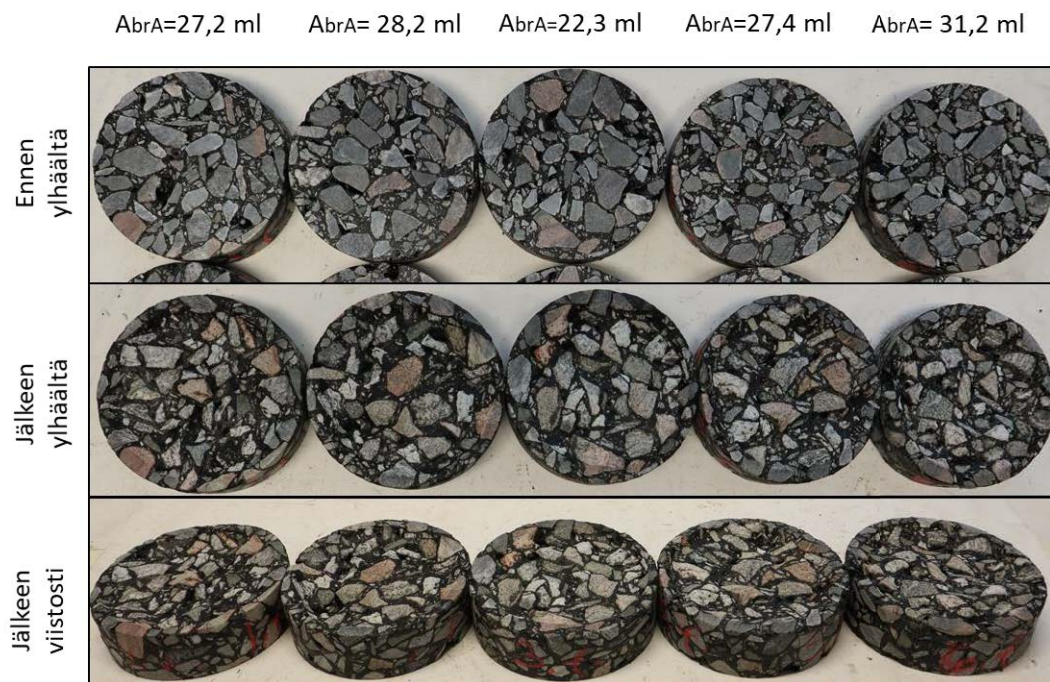


## Massa C FI 0



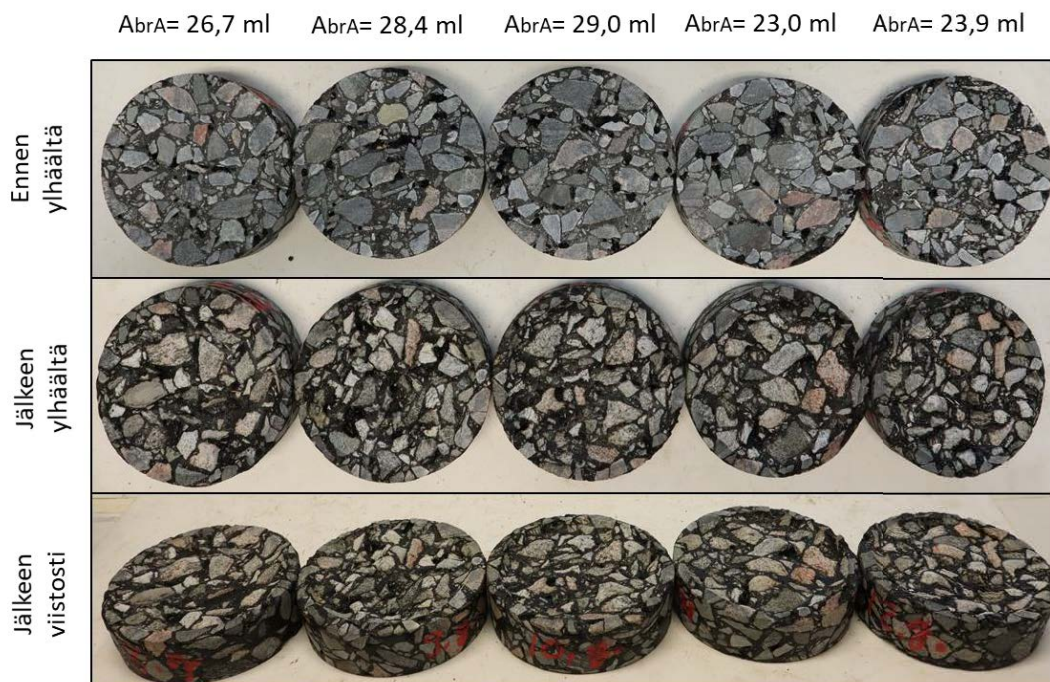
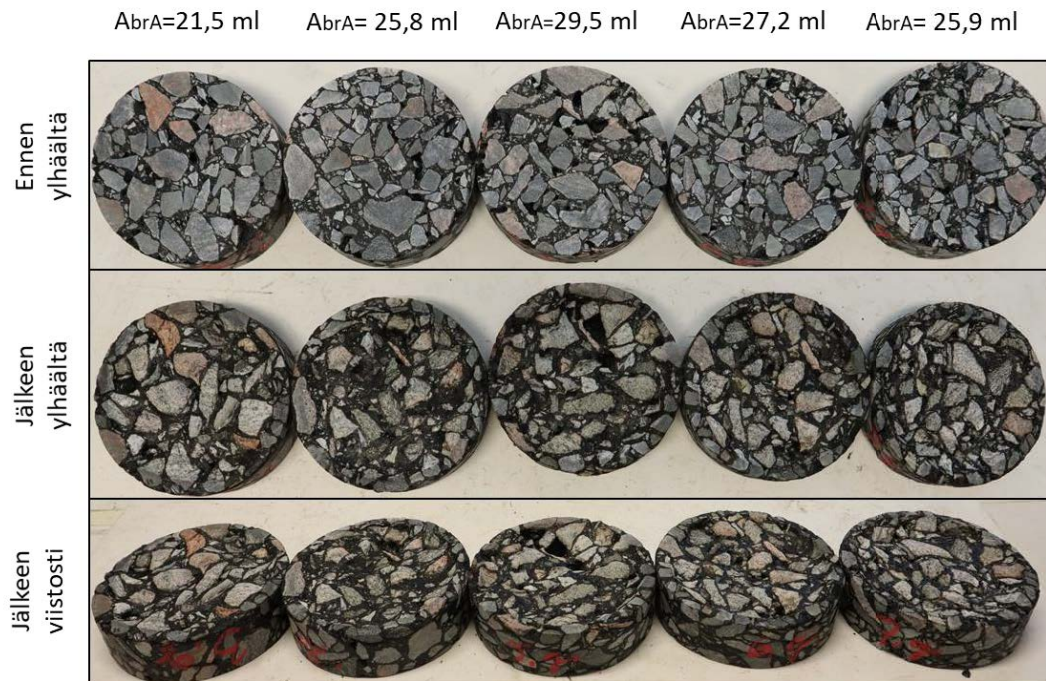


## Massa C FI 10



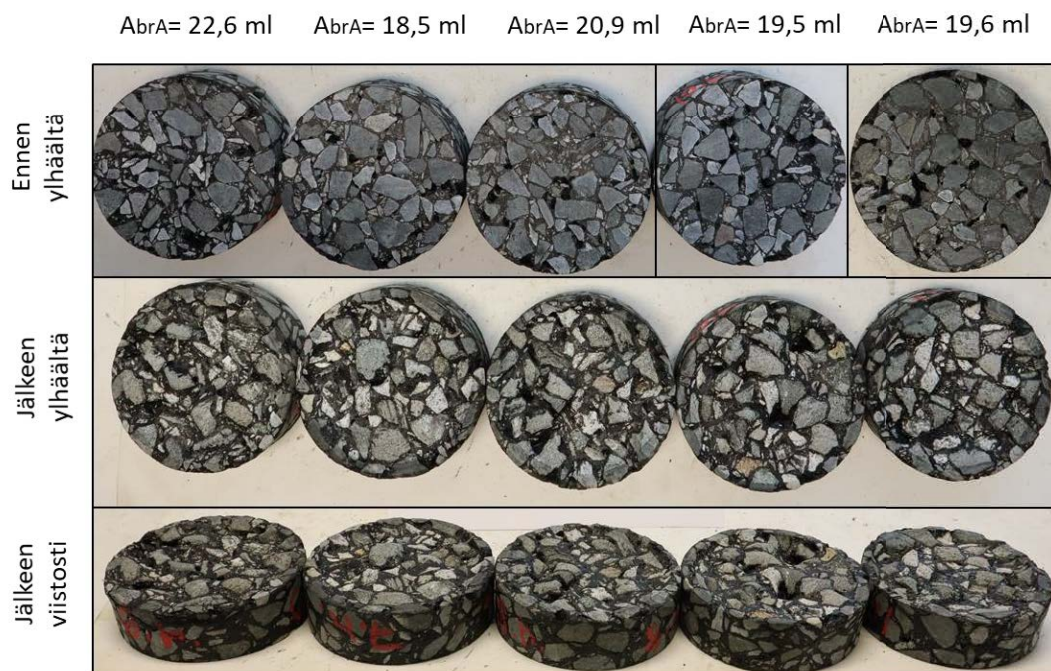
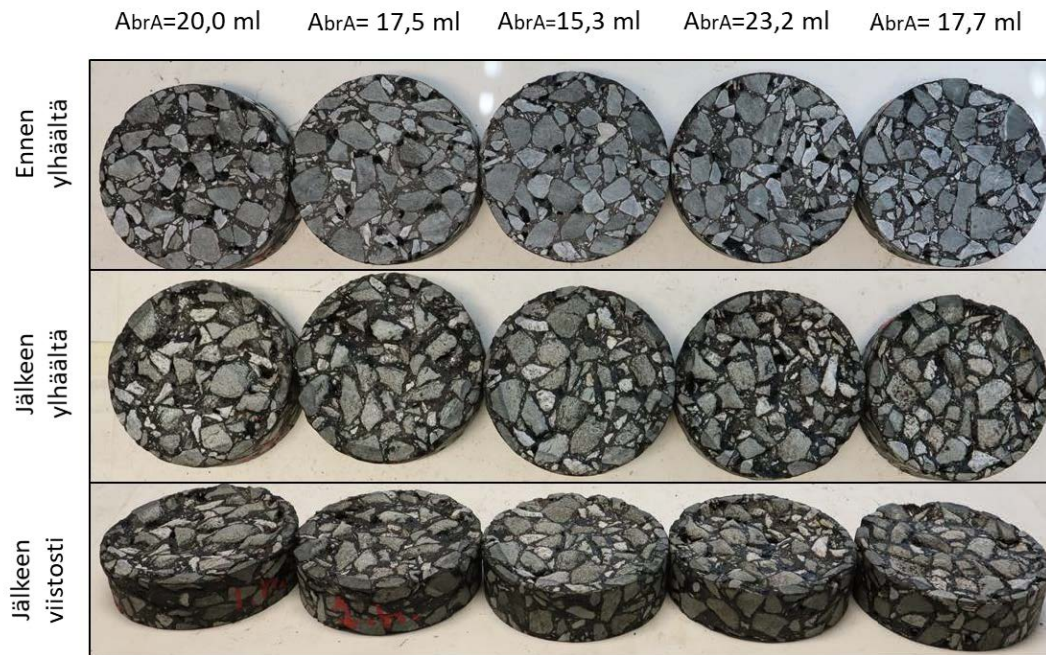


## Massa C FI 20



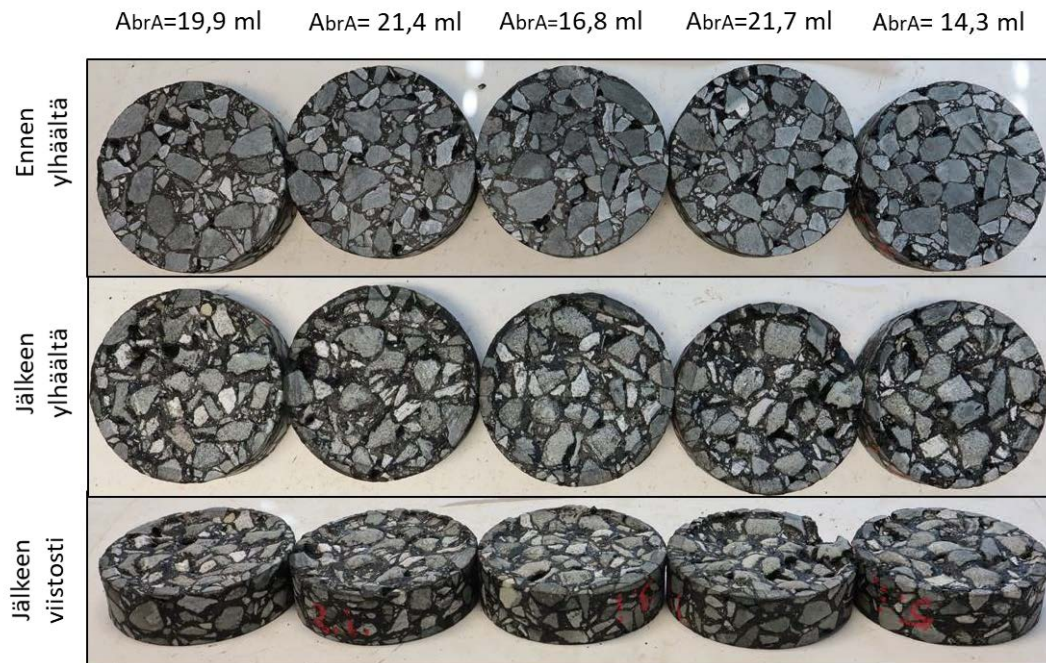


## Massa D FI 0



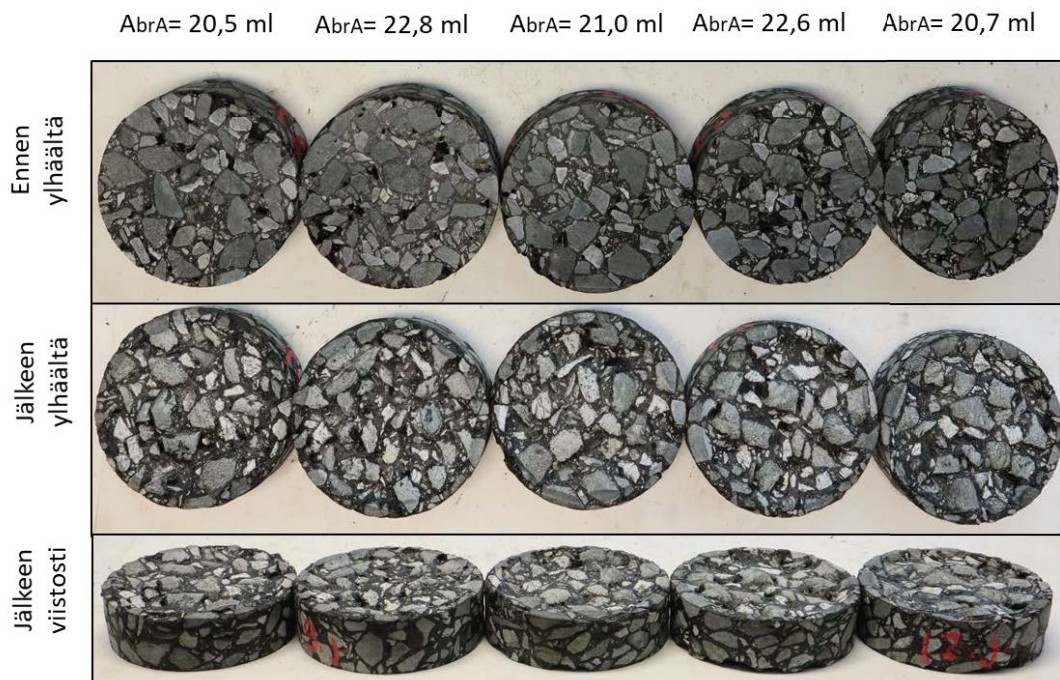
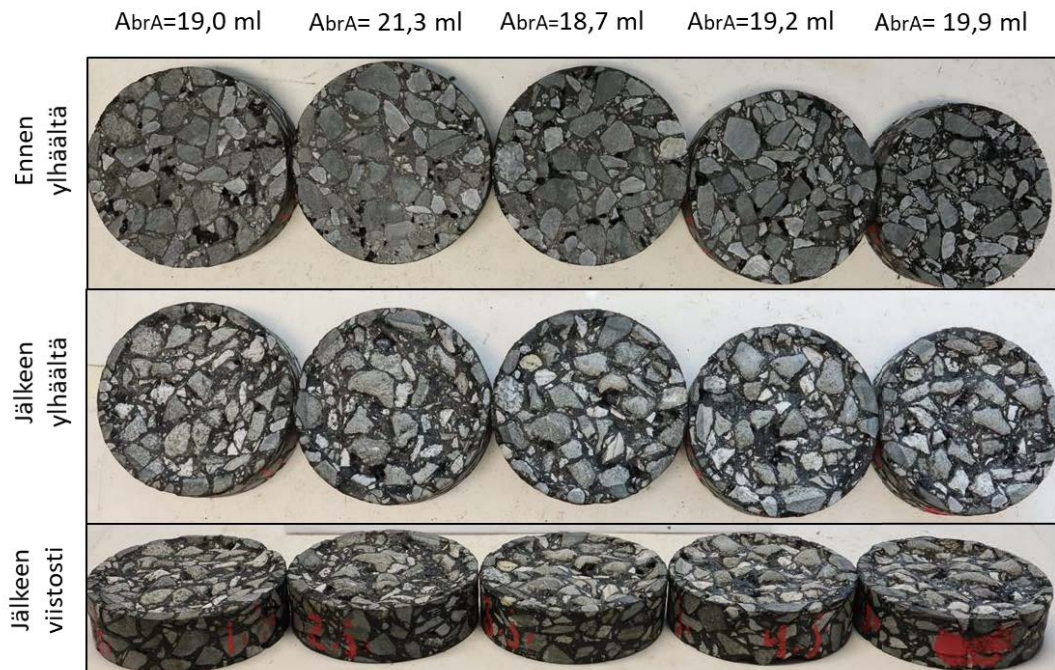


## Massa D FI 10



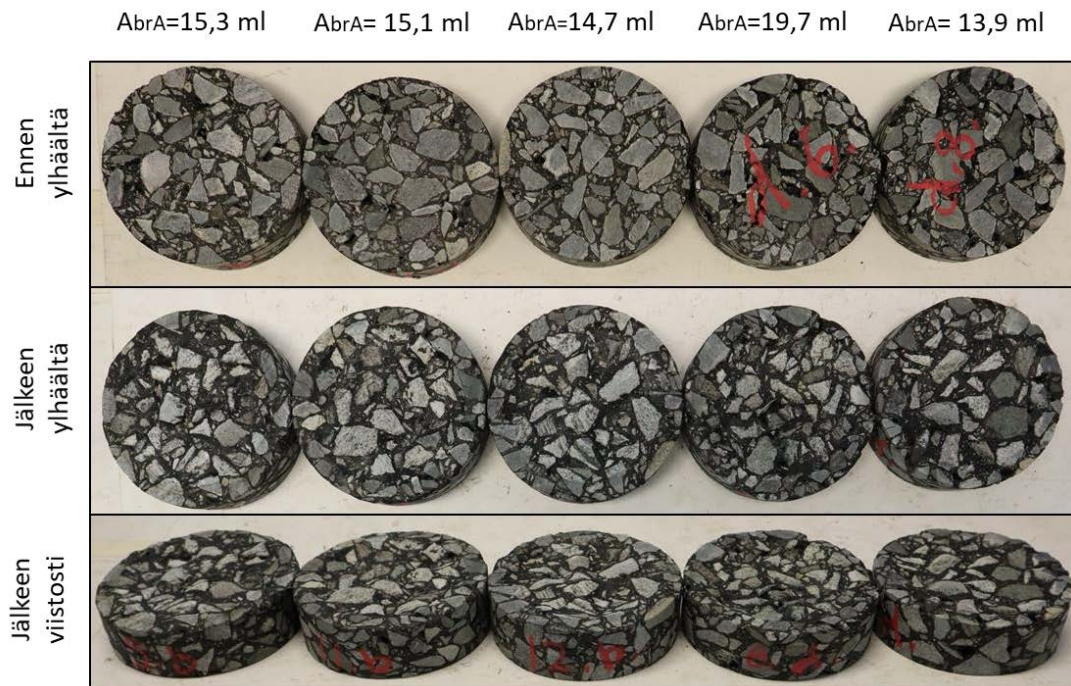


## Massa D FI 20

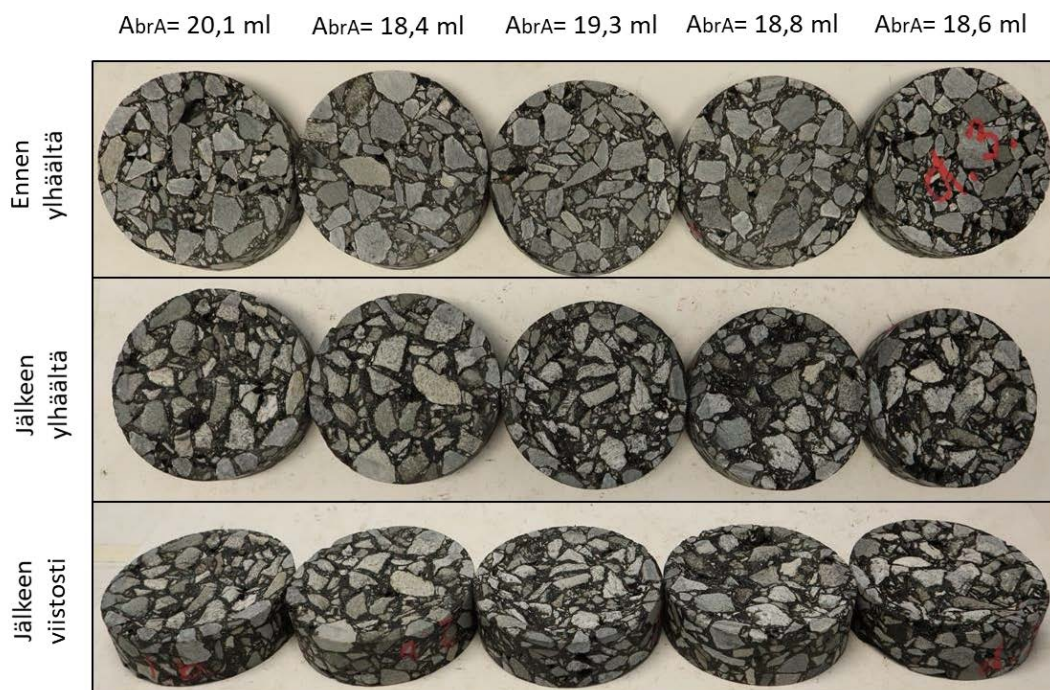




## Laboratorio A (Massa B FI 10)

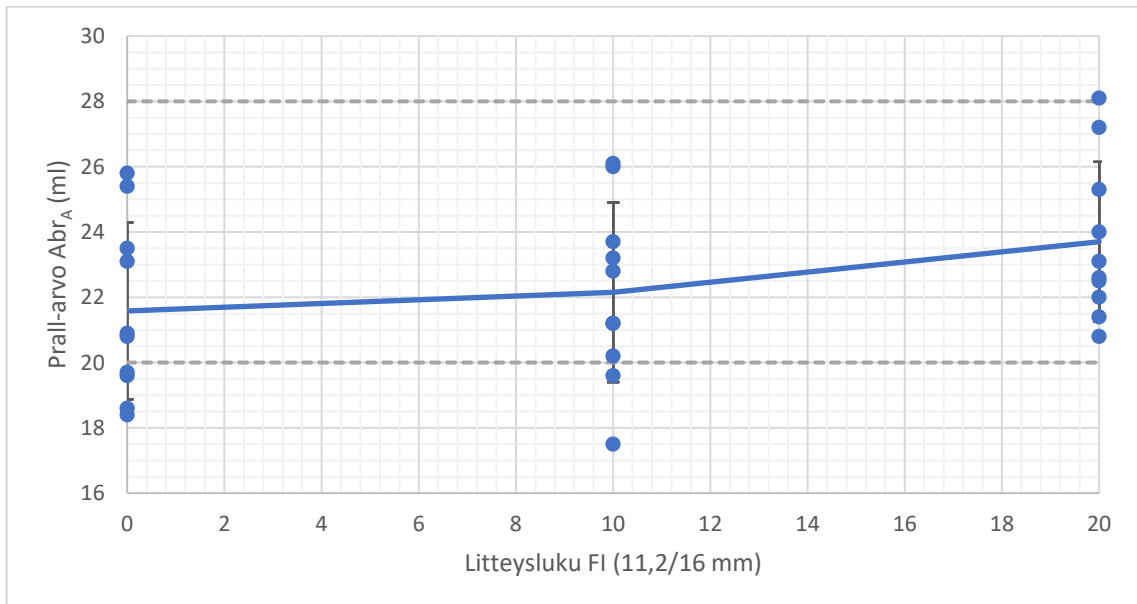


## Laboratorio B (Massa B FI 10)

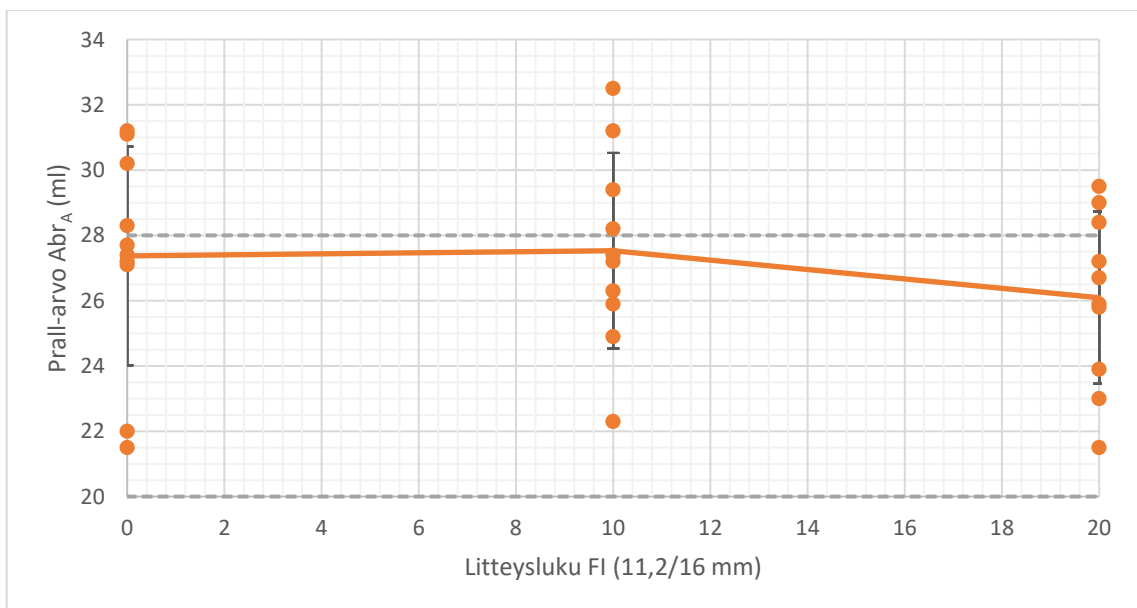


## Yksittäistulokset litteyslukutasoittain

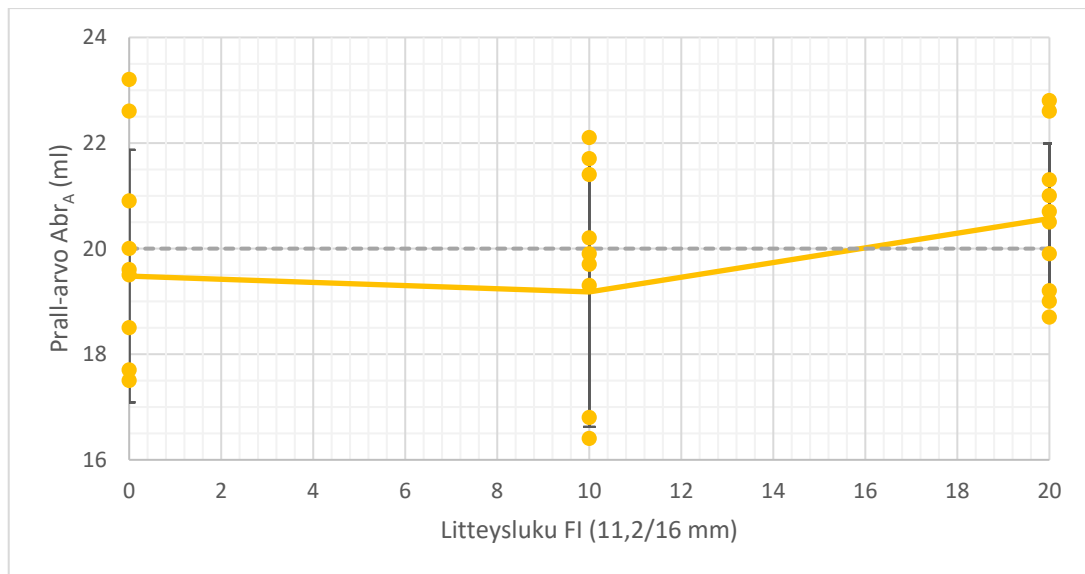
### Massa B



### Massa C



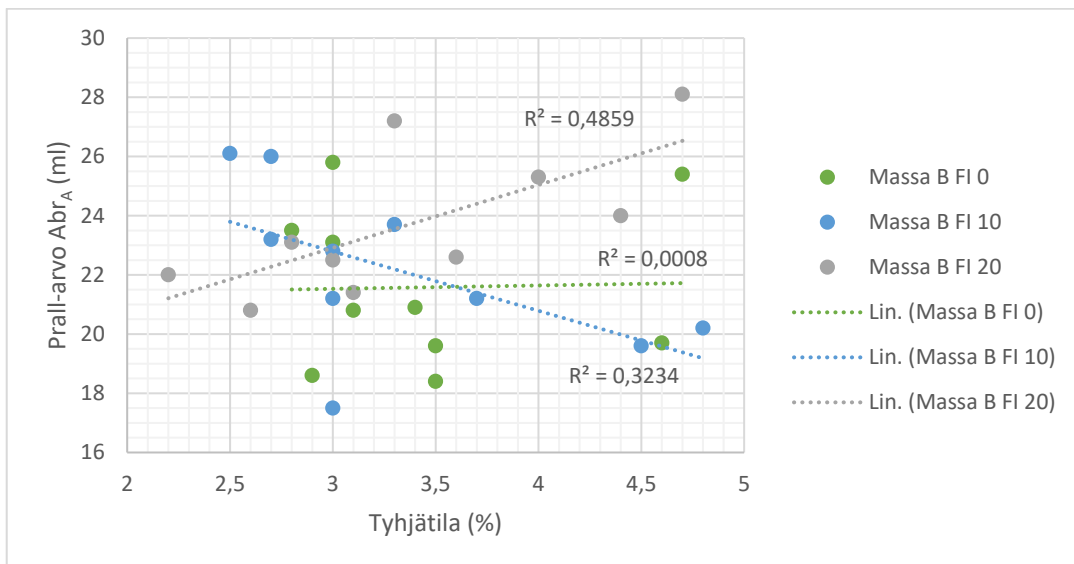
## Massa D



## Näytteiden tyhjätilat

### Massa B

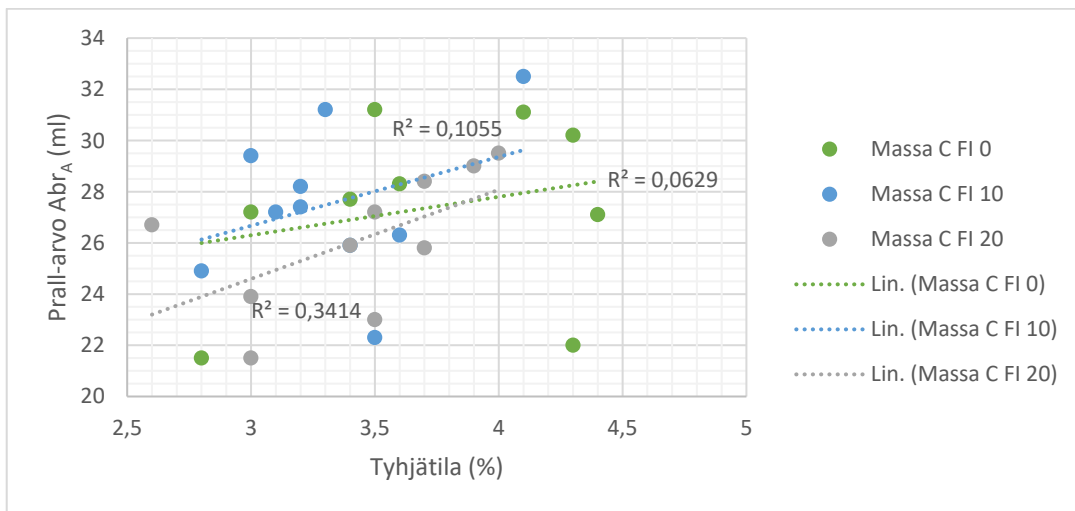
FI 0		FI 10		FI 20	
Tyhjätila (%)	Prall-arvo (ml)	Tyhjätila (%)	Prall-arvo (ml)	Tyhjätila (%)	Prall-arvo (ml)
2,8	23,5	2,5	26,1	2,2	22
2,9	23,1	2,7	23,2	2,6	20,8
3	18,6	2,7	26	2,8	23,1
3	25,8	3	21,2	3	22,5
3,1	20,8	3	22,8	3,1	21,4
3,4	20,9	3	17,5	3,3	27,2
3,5	18,4	3,3	23,7	3,6	22,6
3,5	19,6	3,7	21,2	4	25,3
4,6	19,7	4,5	19,6	4,4	24
4,7	25,4	4,8	20,2	4,7	28,1





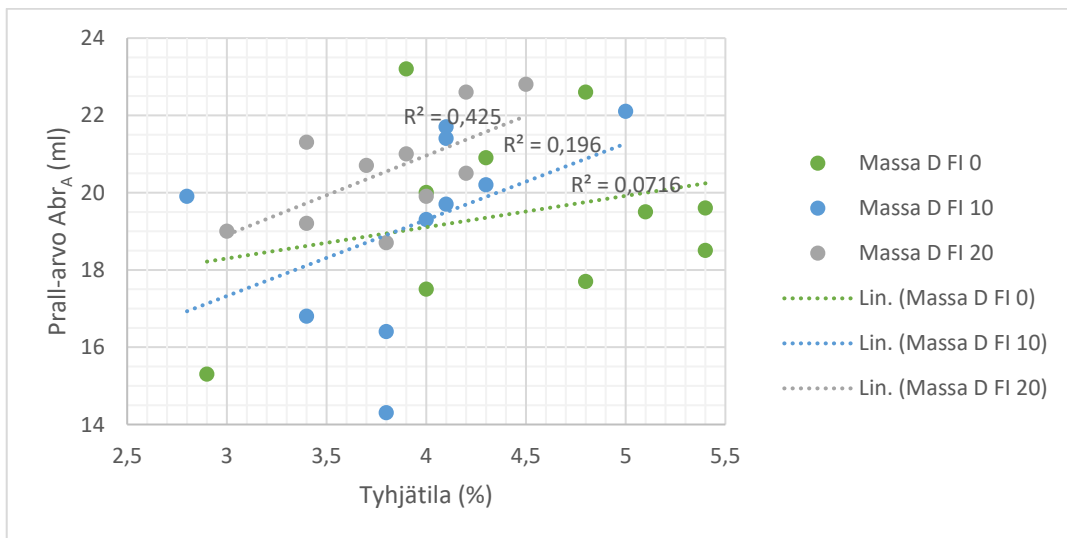
## Massa C

FI 0		FI 10		FI 20	
Tyhjätila (%)	Prall-arvo (ml)	Tyhjätila (%)	Prall-arvo (ml)	Tyhjätila (%)	Prall-arvo (ml)
2,8	21,5	2,8	24,9	2,6	26,7
3,0	27,2	3,0	29,4	3,0	21,5
3,4	27,7	3,1	27,2	3,0	23,9
3,5	31,2	3,2	28,2	3,4	25,9
3,6	28,3	3,2	27,4	3,5	27,2
4,1	31,1	3,3	31,2	3,5	23,0
4,3	22,0	3,4	25,9	3,7	25,8
4,3	30,2	3,5	22,3	3,7	28,4
4,4	27,1	3,6	26,3	3,9	29,0
5,2	27,4	4,1	32,5	4,0	29,5



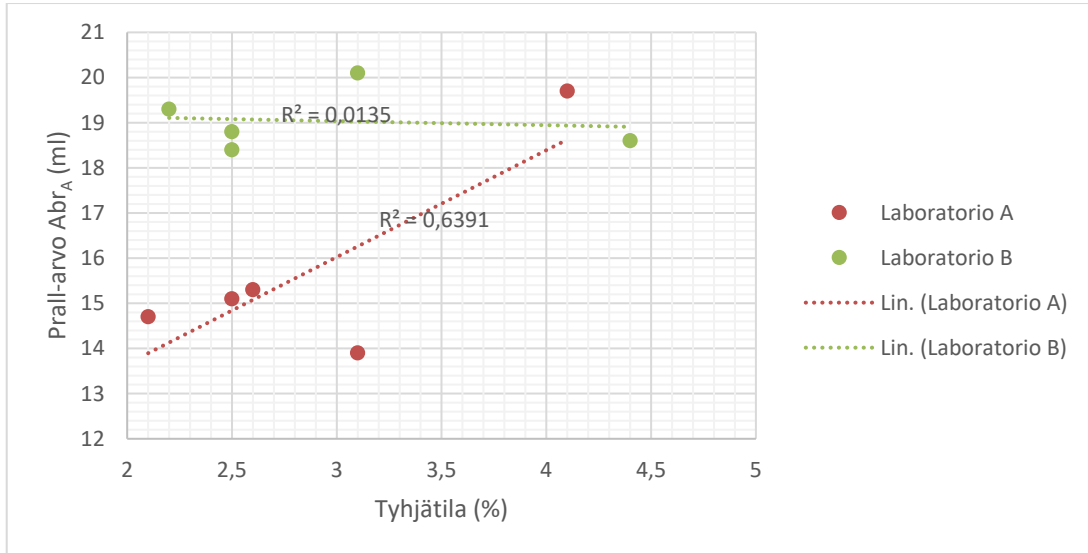
## Massa D

FI 0		FI 10		FI 20	
Tyhjätila (%)	Prall-arvo (ml)	Tyhjätila (%)	Prall-arvo (ml)	Tyhjätila (%)	Prall-arvo (ml)
2,9	15,3	2,8	19,9	3,0	19,0
3,9	23,2	3,4	16,8	3,4	21,3
4,0	20,0	3,8	14,3	3,4	19,2
4,0	17,5	3,8	16,4	3,7	20,7
4,3	20,9	4,0	19,3	3,8	18,7
4,8	17,7	4,1	21,4	3,9	21,0
4,8	22,6	4,1	21,7	4,0	19,9
5,1	19,5	4,1	19,7	4,2	20,5
5,4	18,5	4,3	20,2	4,2	22,6
5,4	19,6	5,0	22,1	4,5	22,8



## Laboratoriot A ja B (Massa B FI 10)

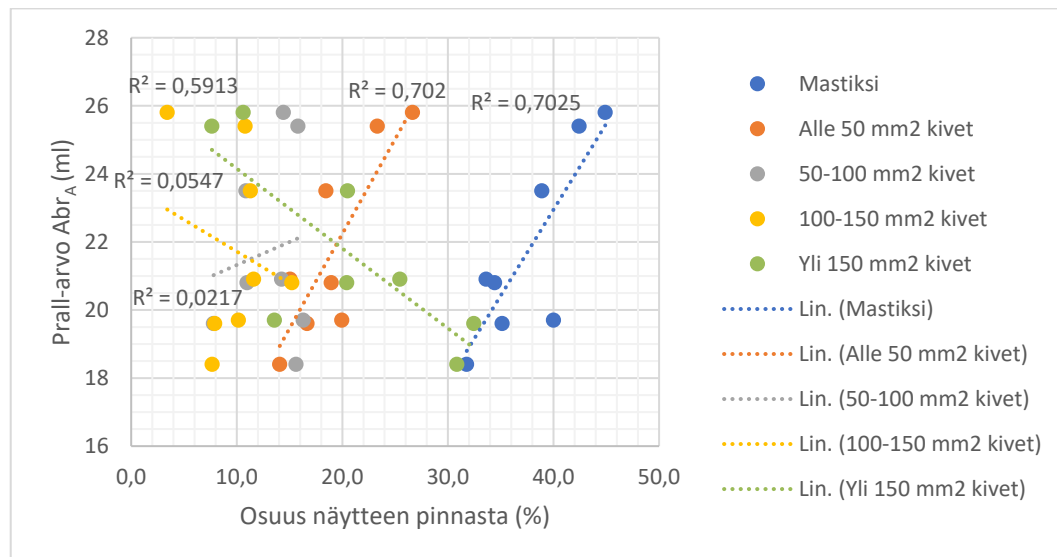
Laboratorio A		Laboratorio B	
Tyhjätila (%)	Prall-arvo (ml)	Tyhjätila (%)	Prall-arvo (ml)
2,1	14,7	2,2	19,3
2,5	15,1	2,5	18,8
2,6	15,3	2,5	18,4
3,1	13,9	3,1	20,1
4,1	19,7	4,4	18,6



## Kuva-analyysin tulokset

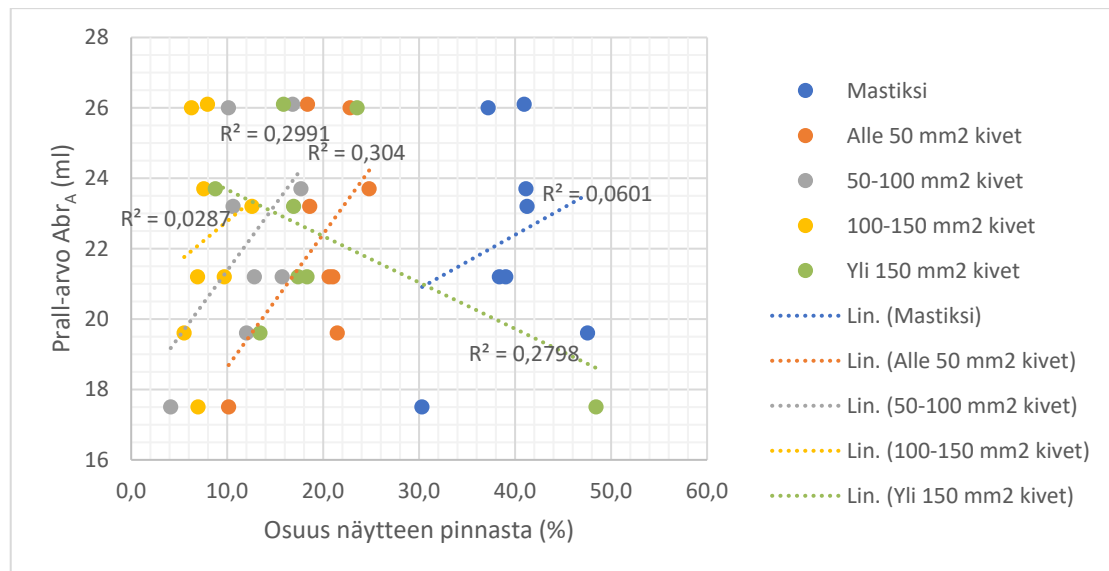
Massa B FI 0

Prall-arvo (ml)	Osuus näytteen pinnasta (%)				
	Mastiksi	Alle 50 mm <sup>2</sup> kivet	50–100 mm <sup>2</sup> kivet	100–150 mm <sup>2</sup> kivet	Yli 150 mm <sup>2</sup> kivet
20,8	34,4	19,0	11,0	15,2	20,4
20,9	33,6	15,1	14,3	11,6	25,5
18,4	31,8	14,1	15,6	7,7	30,9
23,1	–	–	–	–	–
23,5	38,9	18,4	10,9	11,3	20,5
19,6	35,1	16,7	7,8	7,9	32,5
18,6	–	–	–	–	–
25,8	44,9	26,7	14,4	3,4	10,6
19,7	40,0	20,0	16,3	10,2	13,6
25,4	42,4	23,3	15,8	10,8	7,6



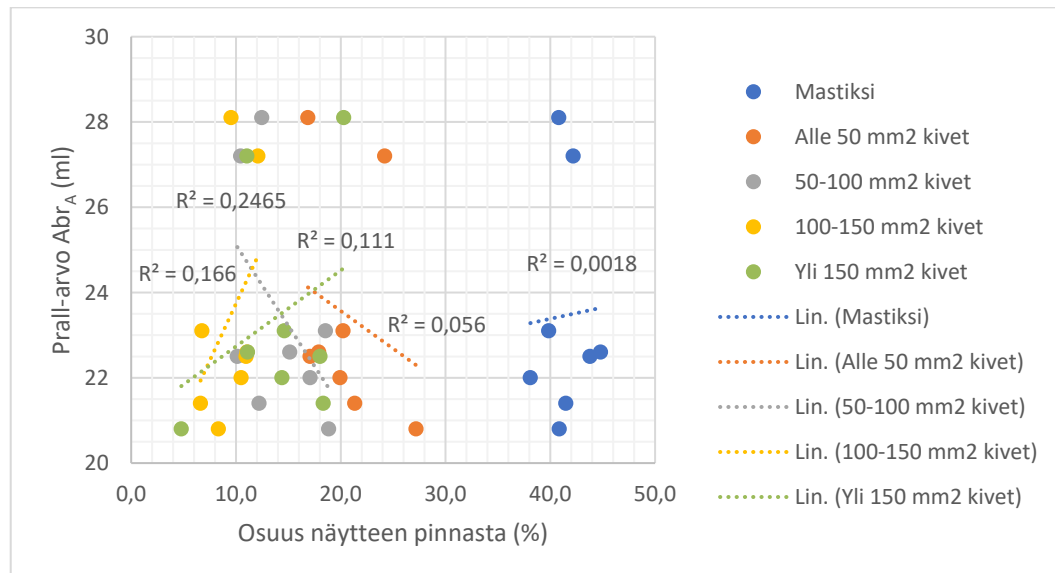
## Massa B FI 10

Prall-arvo (ml)	Osuus näytteen pinnasta (%)				
	Mastiksi	Alle 50 mm <sup>2</sup> kivet	50–100 mm <sup>2</sup> kivet	100–150 mm <sup>2</sup> kivet	Yli 150 mm <sup>2</sup> kivet
26,1	41,0	18,4	16,8	8,0	15,9
21,2	39,0	21,0	12,8	9,7	17,4
26,0	37,2	22,8	10,1	6,3	23,6
17,5	30,3	10,2	4,1	7,0	48,4
19,6	47,6	21,5	12,0	5,5	13,4
23,2	41,3	18,6	10,6	12,6	16,9
20,2	-	-	-	-	-
22,8	-	-	-	-	-
23,7	41,1	24,8	17,7	7,6	8,8
21,2	38,4	20,6	15,7	6,9	18,3



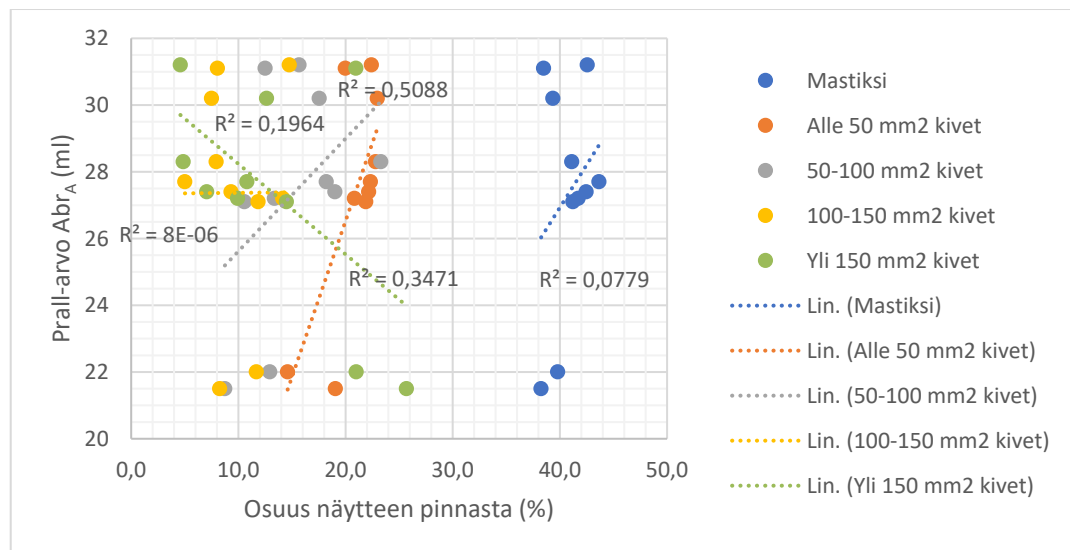
## Massa B FI 20

Prall-arvo (ml)	Osuus näytteen pinnasta (%)				
	Mastiksi	Alle 50 mm <sup>2</sup> kivet	50–100 mm <sup>2</sup> kivet	100–150 mm <sup>2</sup> kivet	Yli 150 mm <sup>2</sup> kivet
21,4	41,5	21,3	12,2	6,6	18,3
22,6	44,8	17,9	15,1	11,1	11,1
23,1	39,9	20,2	18,5	6,8	14,6
27,2	42,2	24,2	10,5	12,1	11,1
22,5	43,8	17,1	10,1	11,0	18,0
28,1	40,8	16,9	12,5	9,5	20,3
25,3	–	–	–	–	–
20,8	40,9	27,2	18,8	8,3	4,8
24,0	–	–	–	–	–
22,0	38,1	19,9	17,1	10,5	14,4



## Massa C FI 0

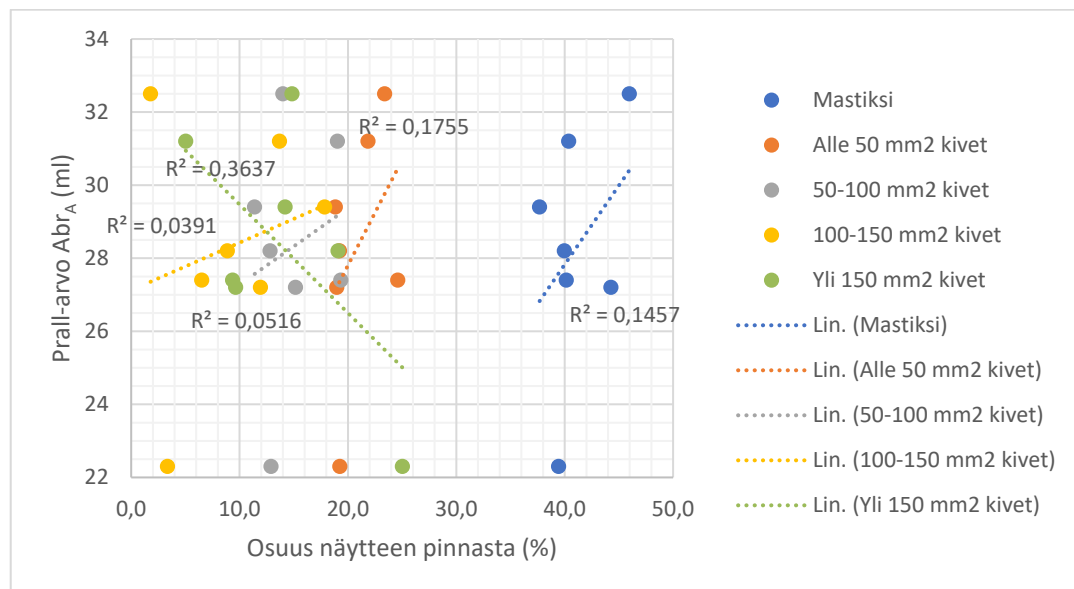
Prall-arvo (ml)	Osuus näytteen pinnasta (%)				
	Mastiksi	Alle 50 mm <sup>2</sup> kivet	50–100 mm <sup>2</sup> kivet	100–150 mm <sup>2</sup> kivet	Yli 150 mm <sup>2</sup> kivet
27,2	41,7	20,8	13,4	14,1	9,9
27,7	43,7	22,3	18,2	5,0	10,8
31,1	38,5	20,0	12,5	8,1	21,0
21,5	38,2	19,1	8,7	8,3	25,7
28,3	41,1	22,8	23,3	7,9	4,9
27,1	41,2	21,9	10,6	11,9	14,5
31,2	42,6	22,4	15,7	14,8	4,6
22,0	39,8	14,6	12,9	11,7	21,0
30,2	39,3	23,0	17,6	7,5	12,6
27,4	42,5	22,2	19,0	9,3	7,1





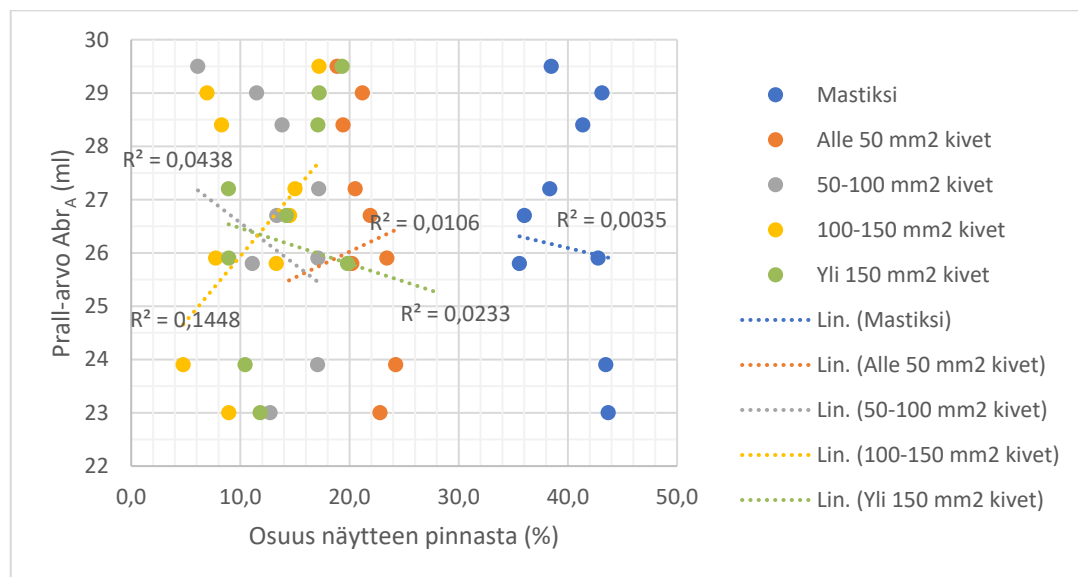
## Massa C FI 10

Prall-arvo (ml)	Osuus näytteen pinnasta (%)				
	Mastiksi	Alle 50 mm <sup>2</sup> kivet	50-100 mm <sup>2</sup> kivet	100-150 mm <sup>2</sup> kivet	Yli 150 mm <sup>2</sup> kivet
27,2	44,3	19,0	15,2	11,9	9,6
28,2	40,0	19,2	12,8	8,9	19,1
22,3	39,4	19,3	12,9	3,4	25,0
27,4	40,1	24,6	19,4	6,5	9,4
31,2	40,4	21,9	19,0	13,7	5,0
25,9	-	-	-	-	-
26,3	-	-	-	-	-
24,9	-	-	-	-	-
32,5	46,0	23,4	14,0	1,8	14,8
29,4	37,7	18,8	11,4	17,9	14,2



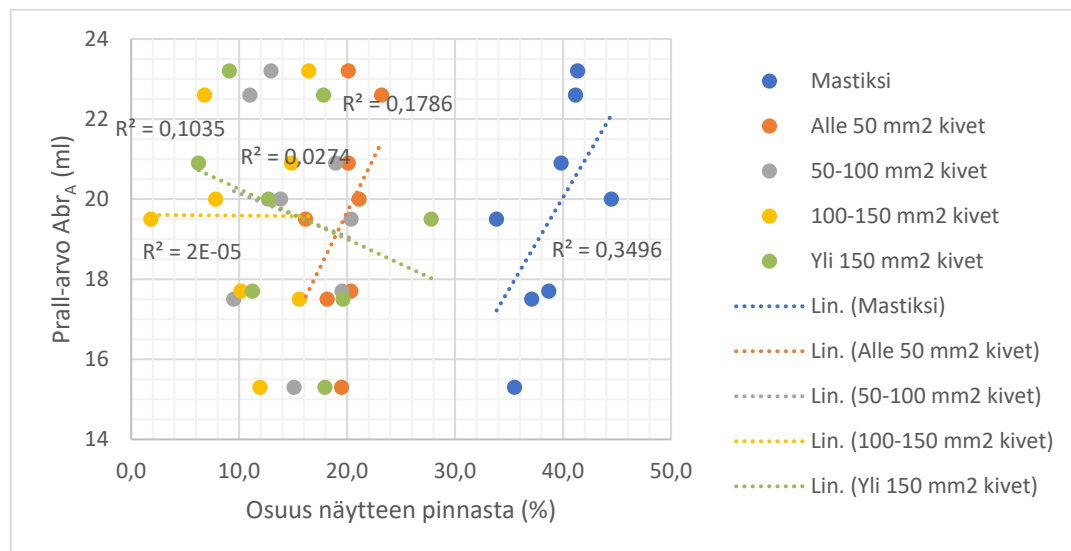
## Massa C FI 20

Prall-arvo (ml)	Osuus näytteen pinnasta (%)				
	Mastiksi	Alle 50 mm <sup>2</sup> kivet	50-100 mm <sup>2</sup> kivet	100-150 mm <sup>2</sup> kivet	Yli 150 mm <sup>2</sup> kivet
21,5	37,6	14,4	10,4	9,4	28,1
25,8	35,6	20,2	11,1	13,3	19,8
29,5	38,5	18,9	6,1	17,2	19,3
27,2	38,4	20,5	17,2	15,0	8,9
25,9	42,8	23,4	17,1	7,7	8,9
26,7	36,0	21,9	13,3	14,5	14,2
28,4	41,4	19,4	13,8	8,3	17,1
29,0	43,1	21,2	11,5	7,0	17,2
23,0	43,7	22,8	12,7	8,9	11,8
23,9	43,5	24,2	17,1	4,8	10,4



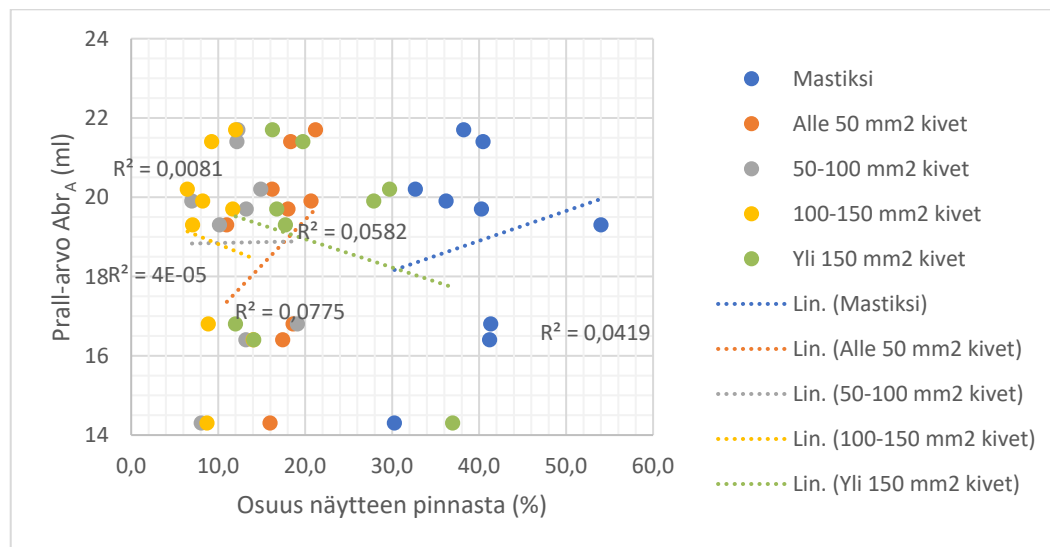
## Massa D FI 0

Prall-arvo (ml)	Osuus näytteen pinnasta (%)				
	Mastiksi	Alle 50 mm <sup>2</sup> kivet	50-100 mm <sup>2</sup> kivet	100-150 mm <sup>2</sup> kivet	Yli 150 mm <sup>2</sup> kivet
20	44,5	21,1	13,9	7,8	12,7
17,5	37,1	18,2	9,5	15,6	19,6
15,3	35,5	19,5	15,1	11,9	18,0
23,2	41,4	20,1	13,0	16,5	9,1
17,7	38,7	20,4	19,5	10,2	11,2
22,6	41,2	23,2	11,0	6,8	17,8
18,5	-	-	-	-	-
20,9	39,8	20,1	19,0	14,9	6,2
19,5	33,8	16,2	20,4	1,8	27,8
19,6	-	-	-	-	-



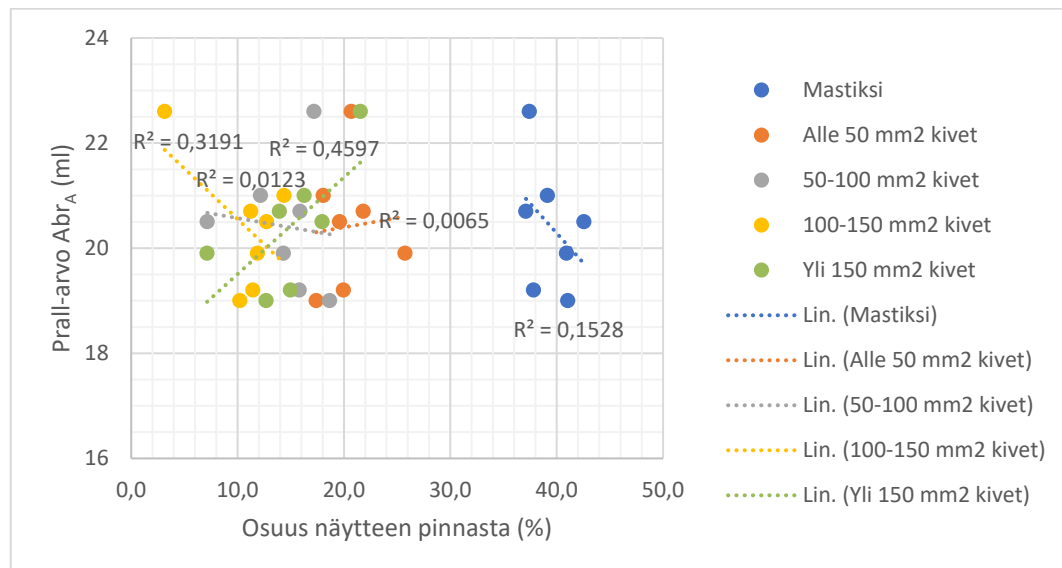
## Massa D FI 10

Prall-arvo (ml)	Osuus näytteen pinnasta (%)				
	Mastiksi	Alle 50 mm <sup>2</sup> kivet	50–100 mm <sup>2</sup> kivet	100–150 mm <sup>2</sup> kivet	Yli 150 mm <sup>2</sup> kivet
19,9	36,2	20,7	7,0	8,2	27,9
21,4	40,5	18,4	12,2	9,3	19,8
16,8	41,4	18,6	19,1	8,9	12,0
21,7	38,2	21,2	12,3	12,0	16,2
14,3	30,3	16,0	8,1	8,7	37,0
19,7	40,3	18,0	13,2	11,7	16,8
22,1	–	–	–	–	–
16,4	41,2	17,4	13,2	14,0	14,1
19,3	54,0	11,0	10,2	7,1	17,7
20,2	32,7	16,2	14,9	6,5	29,7



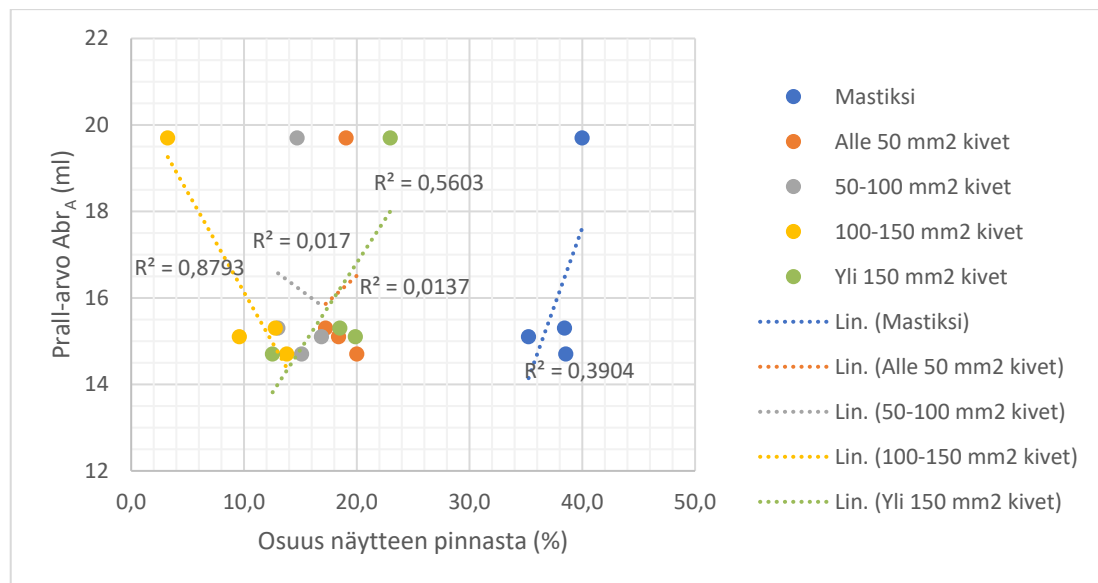
## Massa D FI 20

Prall-arvo (ml)	Osuus näytteen pinnasta (%)				
	Mastiksi	Alle 50 mm <sup>2</sup> kivet	50–100 mm <sup>2</sup> kivet	100–150 mm <sup>2</sup> kivet	Yli 150 mm <sup>2</sup> kivet
19	41,0	17,4	18,7	10,2	12,7
21,3	–	–	–	–	–
18,7	–	–	–	–	–
19,2	37,8	20,0	15,8	11,4	15,0
19,9	40,9	25,7	14,3	11,9	7,1
20,5	42,6	19,6	7,2	12,7	17,9
22,8	–	–	–	–	–
21	39,1	18,1	12,2	14,4	16,3
22,6	37,4	20,7	17,2	3,2	21,5
20,7	37,1	21,8	15,9	11,2	13,9



## Laboratorio A (Massa B FI 10)

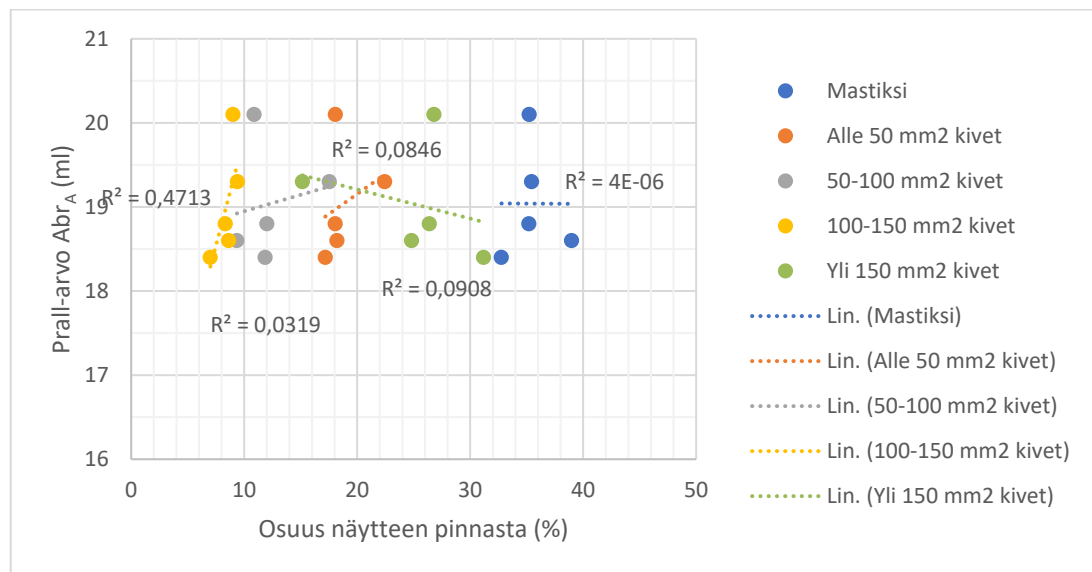
Prall-arvo (ml)	Osuus näytteen pinnasta (%)				
	Mastiksi	Alle 50 mm <sup>2</sup> kivet	50-100 mm <sup>2</sup> kivet	100-150 mm <sup>2</sup> kivet	Yli 150 mm <sup>2</sup> kivet
14,7	38,5	20,0	15,1	13,8	12,5
15,1	35,2	18,4	16,9	9,6	19,9
15,3	38,4	17,2	13,0	12,8	18,5
13,9	-	-	-	-	-
19,7	40,0	19,1	14,7	3,2	23,0





## Laboratorio B (Massa B FI 10)

Prall-arvo (ml)	Osuus näytteen pinnasta (%)				
	Mastiksi	Alle 50 mm <sup>2</sup> kivet	50-100 mm <sup>2</sup> kivet	100-150 mm <sup>2</sup> kivet	Yli 150 mm <sup>2</sup> kivet
19,3	35,4	22,4	17,5	9,4	15,2
18,8	35,2	18,1	12,0	8,3	26,4
18,4	32,8	17,2	11,9	7,0	31,2
20,1	35,2	18,1	10,9	9,0	26,8
18,6	39,0	18,2	9,4	8,6	24,8





Väylävirasto  
Trafikledsverket

ISSN 2490-1202  
ISBN 978-952-317-810-6  
[www.vayla.fi](http://www.vayla.fi)